

THÈSE

présentée

à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

pour obtenir le Diplôme de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Hossein HABIBI

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU PHOSPHORE
DANS LES SOLS FORESTIERS DES PLATEAUX CALCAIRES
DE L'EST DE LA FRANCE

soutenue le 26 Juin 1970 devant la Commission d'Examen

JURY

Président : M. Ph. DUCHAUFOUR

Examineurs : M. M. BONNEAU

M. F. JACQUIN



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551914_0010

THÈSE

présentée

à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

pour obtenir le Diplôme de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Hossein HABIBI

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU PHOSPHORE
DANS LES SOLS FORESTIERS DES PLATEAUX CALCAIRES
DE L'EST DE LA FRANCE

soutenue le 26 Juin 1970 devant la Commission d'Examen

JURY

Président : M. Ph. DUCHAUFOUR

Examineurs : M. M. BONNEAU

M. F. JACQUIN

THÈSE

Présentée

à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris

pour l'obtention du

DIPLOME DE DOCTEUR EN SCIENCES

par M. HENRI HUBERT

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU PHOSPHORE

DANS LES SOLS FORESTIERS DES PLATEAUX CALCAIRES

DE LA FRANCE



Présentée par M. HENRI HUBERT, Docteur en Sciences

Paris

Présentée par M. HENRI HUBERT, Docteur en Sciences

Présentée par M. HENRI HUBERT, Docteur en Sciences

Présentée par M. HENRI HUBERT, Docteur en Sciences

ANNEE SCOLAIRE 1969-1970

Doyen : M. AUBRYAssesseur: M. GAYDoyens honoraires: MM. CORNUBERT, ROUBAULT.Professeurs honoraires: MM. RAYBAUD - LAFITTE - LERAY - JULY - LAPORTE - EICHBORN -
CAPELLE - GODEMENT - DUBREUIL - L.SCHWARTZ - DIEUDONNE - LETORT - DODE - GAUTHIER -
GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN - WAHL.Maîtres de conférences honoraires: MM. LEINHART - PIERRET.Professeurs

MM. URION	Chimie biologique	DUCHAUFOUR	Pédologie
ROUBAULT	Géologie	GARNIER	Agronomie
VEILLET	Biologie animale	NEEL	Chimie organique ind.
BARRIOL	Chimie théorique	BERNARD	Géologie appliquée
BIZETTE	Physique	* CHAMPIER	Physique
GUILLIEN	Electronique	* GAY	Chimie biologique
LEGRAS	Mécanique rationnelle	STEPHAN	Zoologie
BOLFA	Minéralogie	* CONDE	Zoologie
NICLAUSE	Chimie	* WERNER	Botanique
FAIVRE	Physique appliquée	EYMARD	Calcul différentiel et intégral.
AUBRY	Chimie minérale	FELDEN	Physique
COPPENS	Radiogéologie	* GOSSE	Mécanique physique
DUVAL	Chimie	* DAVOINE	Physique (ENSMIM)
FRUNHLING	Physique	HORN	Physique
HILLY	Géologie	* ROCCI	Géologie
LE GOFF	Génie chimique	* Mme LUMER	Maths.
SUHNER	Physique expérimentale	DELPUECH	Chimie physique
CHAPON	Chimie biologique	HUET	Analyse supérieure
HEROLD	Chimie minérale indust. Mle	BLAZY	Minéralogie appliquée
SCHWARTZ B.	Exploitation minière	N.....	Chimie biologique
MALAPRADE	Chimie	N.....	Mécanique appliquée
* MANGENOT	Botanique	N.....	Méthode Mathématique de la physique
GAYET	Physiologie	N.....	Mécanique rationnelle
HADNI	Physique		
* BASTICK	Chimie	N.....	

* = Professeur titulaire à titre personnel.

Professeurs sans chaire

Mme BASTICK	Chimie P.C. (Epinal)	CACHAN	Entomologie appliquée (E.N.S.A.)
M.M. GUDEFIN	Physique	JACQUIN	Pédologie et chimie agricole.
VUILLAUME	Psychophysiologie	MAINARD	Physique M.P.
FRENTZ	Biologie animale	MARTIN	Chimie P.C.
MARI	Chimie (I.S.I.N.)	PAULMIER	Mécanique expérimentale
DEVIOT	Physique du solide	PROTAS	Minéralogie
FLECHON	Physique M.P.C.	RIVAIL	Chimie appliquée (C.U.C.E.)
VIGNES	Métallurgie	DEPAIX	Probabilités et statistiques.
JURAIN	Géologie C.B.G.		
BALESDENT	Thermodynamique chimique appliquée (E.N.S.I.C.)		
JANOT	Physique P.C. (Epinal)		

Maîtres de Conférences

MM. VILLERMAUX	Génie Chimique	CASTRO	Chimie organique
METCHE	Biochimie appliquée (brasserie)	DEXHEIMER	Botanique
BAUMANN	Physique 1 ^o Cycle	NOVERRAZ	Mathématiques
DURAND	Physique	TOURET	Géologie
GRANGE	Physique (ISIN)	N....	Maths appliqués
BAVEREZ	Chimie (ENSIC)	N....	Mathématiques
CHAMBON	Exploitation Minière (Mines)	N....	Mathématiques
HUSSON	Physique (ENSEM)	N....	Physiologie animale
WEISSLINGER	Physique	N....	Chimie (ENSIC)
GERL	Physique (ENSEM)	N....	Laiterie (Ecole Lait.)
ROQUES	Chimie Minérale	N....	Chimie organique
FERRIER	Mathématiques	N....	Maths appliquées
GILORMINI	Mécanique flui. ISIN		
HILY	Mathématiques P.C.		

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

MM. AMARIGLIO - COEURE - DAVRAINVILLE - GIRARDEAU - OVAERT - BUYER - WEBER - PUJOL - SCHREIBER.

- A Monsieur le Professeur DUCHAUFOUR

c'est grâce à son enseignement et à l'aide précieuse que j'ai toujours trouvée auprès de lui, que j'ai pu mener à bien ce travail, ce dont je le remercie respectueusement.

- A Monsieur BONNEAU, Directeur de la Station de recherches sur les sols forestiers et la fertilisation qui m'a inlassablement guidé dans ce travail et m'a conseillé avec bienveillance.

- A Monsieur JACQUIN, Professeur à la Faculté des Sciences, pour avoir eu l'obligeance de juger ce travail.

- A Monsieur LE TACON, chargé de recherches à la Station "sols forestiers et fertilisation" du C.N.R.F. en qui j'ai trouvé un ami très précieux.

- A Monsieur MILLIER, chargé de recherches à la Station de biométrie du C.N.R.F. qui a programmé une partie des analyses statistiques.

- A tout le Personnel de la Station de recherches sur les sols forestiers du C.N.R.F. en particulier à Monsieur CLEMENT, pour certains conseils analytiques.

- A l'Institut National de recherches agronomiques et au Centre National de recherches forestières au sein duquel j'ai pu réaliser ce travail.

*A Monsieur le Professeur TREGUBOV auquel je
garderai une éternelle reconnaissance.*

S O M M A I R E

	Page
INTRODUCTION.....	1
I - METHODE GENERALE DE TRAVAIL.....	4
II - DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES DE SOLS ETUDIES...	5
21 - Sols décarbonatés.....	5
211 - Sols lessivés.....	5
212 - " bruns lessivés.....	6
213 - " bruns.....	6
22 - Sols carbonatés.....	6
221 - Rendzines humifères (type).....	6
222 - " brunifiées humifères.....	6
223 - Sols bruns calcaires.....	7
224 - " bruns calacires colluviaux.....	7
III - COMPARAISON DES DIFFERENTES FORMES DE PHOSPHORE EN SOL CARBONATE ET SOL DECARBONATE.....	8
31 - Rappels bibliographiques.....	8
311 - Le phosphore minéral.....	8
312 - Evolution des différentes formes de phosphore lié au calcium dans les sols carbonatés.....	11
313 - Le phosphore organique.....	12
32 - Différentes formes de phosphore étudiées et métho- des employées.....	14
33 - Résultats et discussion.....	16
331 - Variations des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur.....	16
332 - Poucentages des diverses formes de phosphore, par rapport au phosphore total, et comparaison de ces pourcentages en fonction du type de sol.	25
34 - Conclusion.....	32

.../...

IV - CORRELATION ENTRE LE PHOSPHORE EXTRAIT PAR LES HUIT METHODES ET LE NIVEAU DE NUTRITION EN PHOSPHORE DE L'EPICEA.....	33
41 - Introduction.....	33
42 - Description et principe des méthodes.....	34
421 - Méthode DUCHAUFOR - BONNEAU.....	34
422 - " " " modifiée.....	35
423 - " FIEDLER.....	36
424 - " MOLLER et MOGENSEN.....	37
425 - " JORET - HEBERT.....	37
426 - " " " modifiée.....	38
427 - " à l'acide sulfurique à concentration variable.....	38
429 - Méthode SEN GUPTA et CORNFIELD.....	39
43 - Résultats et discussion.....	39
431 - Corrélation entre P_2O_5 des aiguilles et P_2O_5 du sol exprimé en %.....	44
432 - Corrélation entre le phosphore des aiguilles et phosphore du sol exprimé en poids par volume de sol.....	46
4321 - Corrélation par tranche de sol.....	46
4322 - " pour l'ensemble du profil..	48
433 - Corrélation entre phosphore des aiguilles et phosphore du sol suivant le type génétique de sol.	50
44 - Conclusion.....	50
V - COMPARAISON DES HUIT METHODES EMPLOYES.....	53
51 - Solubilité des diverses combinaisons chimiques de phosphore dans les réactifs d'extraction des méthodes de dosage employées.....	53

.../...

52 - Formes de phosphore du sol, solubilisé par les différents réactifs d'extraction.....	56
521 - Corrélation entre méthodes d'extraction et formes de phosphore.....	57
522 - Résultats de l'analyse par régression progres- sive multiple.....	60
53 - Etude des corrélations existant entre les 8 métho- des.....	67
531 - Etude des coefficients de corrélation totaux entre les 8 méthodes pour l'ensemble des échantillons.....	67
532 - Corrélation entre les différentes méthodes en fonction de la teneur en calcaire.....	69
54 - Conclusion.....	74
VI - RESUME ET CONCLUSION GENERALE.....	78
ANNEXES.....	84
BIBLIOGRAPHIE.....	106

E R R A T U M

- Page 2 - 16ème ligne : il existe certainement pas, lire : il n'existe certainement pas
- Page 2 - 22ème ligne : la méthode H_2SO_4 NaOH , lire : la méthode $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{NaOH}$
- Page 3 - 3ème ligne : de voir quelle mesure, lire : de voir dans quelle mesure
- Page 6 - 9ème ligne : l'argile est supérieur à 2, lire, l'argile est inférieur à 2
- Page 14 - 16ème ligne : suivant technique, lire, suivant la technique
- Page 30 - Bas du tableau 5 : XXX = t significatif au risque 1 %, lire
XXX = t significatif au risque 1 ‰
- Page 39 - Dernière ligne : (en %), lire (en ‰)
- Page 43 - Première ligne du tableau : P_2O_5 du sol extrait par les huit méthodes exprimés en %, lire P_2O_5 du sol extrait pas les huit méthodes exprimés en ‰
- Page 49 - Tableau 10, colonne VI : supprimer une +
- Page 58 - Bas du tableau I2 : +++ = significatif au risque de 1%, lire,
+++ = significatif au risque de 1‰
- Page 66 - 17ème ligne : extrai-elle, lire, extrait-elle
- Page 71 - Tableau I5 : +++ = significatif au risque 1 %, lire
+++ = significatif au risque 1 ‰
- Page 82 - Toutes les valeurs de diagnostic doivent être exprimées en 1 ‰ au lieu de %.

- INTRODUCTION

La connaissance des différentes formes de phosphore du sol et la façon dont ces formes contribuent à l'alimentation des végétaux ont fait des progrès considérables depuis une quinzaine d'années. Citons parmi beaucoup d'autres les travaux de BLANCHET 1957, puis BLANCHET, STUDER, CHAUMONT 1962, et BLANCHET, CHAUMONT 1964, CHANG et JACKSON 1969, GACHON 1966 et GACHON 1969.

Le phosphore joue un rôle essentiel chez les végétaux. Rappelons qu'il se trouve dans les cellules végétales, soit sous forme minérale (phosphate), soit sous forme organique. Les formes minérales interviennent dans la pression osmotique et jouent un rôle de tampon du pH. Les formes phosphorées organiques peuvent être des métabolites terminaux, comme les nucléotides et les acides nucléiques qui sont les constituants essentiels des noyaux. D'autres formes phosphorées organiques sont des métabolites intermédiaires dans la photosynthèse ou dans la dégradation des glucides.

L'importance du phosphore en matière forestière comme en agriculture n'est plus à démontrer. En FRANCE, comme à l'étranger, la fertilisation phosphatée se montre souvent la plus efficace sur les jeunes plantations. Dans les Landes de Gascogne par exemple, sur semis de pins maritimes, la fertilisation phosphatée est entrée dans la pratique courante.

D'une manière générale, les problèmes de dosage du phosphore dans les sols sont très complexes. Il est en effet difficile de savoir quelles formes de phosphore sont réellement utilisables par le végétal, et encore plus difficile de doser ces formes par les techniques rapides ou praticables en série.

.../...

En matière forestière, le problème est encore loin d'être résolu. Il semble en effet que les arbres soient capables d'extraire du sol des formes de phosphore peu solubles, inassimilables par les végétaux cultivés. Ce fait serait dû d'une part à la pérennité des essences forestières (50 à 100 ans et même beaucoup plus) et d'autre part l'existence de mycorhizes qui permettraient à l'arbre d'extraire ces formes insolubles (LENTSCHIG). Les forestiers ont donc cherché des méthodes d'extraction du phosphore plus brutales que celles utilisées en agriculture.

En FRANCE, on utilise couramment une double extraction à l'acide sulfurique N/250 et à la soude N/10. On s'est aperçu que parfois cette méthode pouvait donner des résultats insuffisants (lande de Gascogne BONNEAU - LE TACON 1968) et on s'oriente comme beaucoup de stations vers un mode d'extraction plus puissant encore, l'acide chlorhydrique concentré et chaud.

Mais il existe certainement pas de méthode valable pour tous les types de sols. Dans un travail précédent (HABIBI 1968), nous avons comparé trois méthodes d'extraction du phosphore (méthodes DUCHAUFOR, BONNEAU H_2SO_4 N/250 + NaOH N/10, FIEDLER modifiée - Hcl concentré et chaud, DYER - acide citrique à 2 %) dans les sols forestiers très divers, où nous connaissons indirectement le comportement des essences forestières vis-à-vis du phosphore. Dans l'ensemble, la méthode H_2SO_4 NaOH s'est révélée la plus satisfaisante. Néanmoins, pour les sols des landes de Gascogne, il faudra pratiquer simultanément la méthode Hcl concentré et la méthode H_2SO_4 + NaOH. Pour certains sols du Massif Central, aucune des trois méthodes ne donne de résultats satisfaisants. De même pour les sols calcaires, aucune de ces trois méthodes ne semblait fournir de bon diagnostic.

Mais il faut noter que le nombre d'échantillons dont nous dispo-

sions pour ces sols calcaires était insuffisant pour se faire une opinion définitive. Nous allons donc essayer dans le travail qui va suivre de voir quelle mesure il est possible d'apprécier la disponibilité du phosphore dans ce type de sol. Le phosphore se révèle être en effet un facteur important de croissance dans les sols carbonatés pour l'épicéa. Un travail en cours montre que la production de l'épicéa sur les sols calcaires est très corrélée avec le niveau de nutrition en phosphore des aiguilles.

I - METHODE GENERALE DE TRAVAIL

Nous nous proposons :

1° - de comparer les différentes formes de phosphore existant dans les sols carbonatés et les sols décarbonatés. Pour cela, nous avons étudié cinq profils de chacun de ces deux grands "types" de sol.

2° - de comparer entre elles huit méthodes d'extraction du phosphore. Pour cela, nous avons prélevé un échantillon par horizon, jusqu'à la profondeur maximale d'enracinement, pour chacun des vingt et un profils.

3° - de comparer le phosphore extrait par ces huit méthodes et le niveau de nutrition en phosphore de l'épicéa en utilisant les analyses foliaires effectuées au cours d'une enquête sur la production de l'épicéa sur les plateaux calcaires de l'Est de la FRANCE (LE TACON : travail en cours).

4° - de tester la solubilité de différentes formes de phosphore chimiquement bien déterminées dans les réactifs d'extraction des différentes méthodes que nous avons utilisées.

5° - d'étudier statistiquement les liaisons pouvant exister entre les formes de phosphore du sol et le phosphore extrait par les différentes méthodes. Pour cela, nous avons travaillé sur vingt trois échantillons correspondant à cinq profils de sols carbonatés (les mêmes que dans l'étude 1°).

II - DESCRIPTION DES DIFFERENTS TYPES ETUDIES

Tous les sols que nous avons étudiés sont situés sur les plateaux calcaires de l'Est de la FRANCE, Ces plateaux calcaires forment un arc de cercle s'appuyant au sud sur le Morvan et au Nord sur le Massif Ardennais. Cet arc de cercle englobe du sud au nord le Plateau de Langres, le Châtillonnais, la Côte des Bars, le Bassigny, les Côtes de Moselle, et les Côtes de Meuse. Les latitudes extrêmes que nous avons atteintes sont celles de Montbard au sud et celle de Verdun au nord, de Nancy à l'Est, tandis qu'à l'Ouest les stations les plus extrêmes sont situées dans les environs de Vitry-le-François. Les roches-mères appartiennent à deux grands types, soit des marnes, soit des calcaires. Les marnes appartiennent à l'étage oxfordien et les calcaires appartiennent au Jurassique moyen (Bajocien et Bathonien) ou au Jurassique supérieur (Argovien, Rauracien, Sequanien, Portlandien et Kimmeridgien).

Ce substratum secondaire est en partie recouvert par des formations récentes tertiaires ou quaternaires qui ont une très grande importance. Ces formations superficielles sont de la terra fusca, des limons, de la grouine, des colluviums, des alluvions anciennes ou récentes.

L'analyse détaillée et la situation exacte des différents sols seront données en annexe.

2I - Sols décarbonatés

Les cinq profils entièrement décarbonatés que nous avons étudiés appartiennent à trois types : sols lessivés, sols bruns lessivés et sols bruns.

2II - Sols lessivés

Ils se sont développés sur terra fusca ou sur terra fusca et limons. L'humus est un mull eutrophe, épais de 5cm environ.

Le pH est un peu inférieur à 5 en surface et augmente en profondeur. Le taux de saturation passe par un minimum en A₂ et atteint près de 100% en B. L'indice d'entraînement du fer et de l'argile est supérieur à 2.

2I2 - Sols bruns lessivés

La roche-mère est toujours la terra fusca. L'humus est encore un mull eutrophe de 5cm d'épaisseur environ, de pH compris entre 5 et 5,5 et à C/N de 18. Le taux de saturation est de 75% en A₁ et s'abaisse à 45% en A₂, pour atteindre 80 à 100% en B. L'indice d'entraînement du fer et de l'argile est supérieur à 2.

2I3 - Sols bruns

Les sols bruns que nous avons étudiés se sont développés sur un mélange de valanginien sableux et de limons. La texture est sablo-limoneuse. Le pH de l'horizon organique, qui est un mull acide, a un C/N inférieur à 20. Le taux de saturation est relativement bas dans l'ensemble du profil, sauf en A₁ où il est de 20%. Il n'y a aucun entraînement du fer et de l'argile.

22 - Sols carbonatés

Les 2I profils entièrement carbonatés appartiennent à quatre types: rendzines humifères, rendzines brunifiées humifères, sols bruns calcaires, sols bruns calcaires colluviaux.

22I - Rendzines humifères

Ces sols ont un profil de type A/C. L'humus est un mull calcique, bien structuré, riche en matière organique, épais de trente centimètres en moyenne. Le pH est toujours supérieur à 7 dans tout le profil, mais ne dépasse jamais 8 en surface.

222 - Rendzines brunifiées humifères

Ces sols ont un profil de type A/(B)/C. L'humus est un mull calcique, noir, riche en matière organique, mais moins épais que celui des rendzines types.

La partie supérieure de l'horizon A_1 est décarbonatée sur quelques centimètres. En surface, le pH est légèrement inférieur à 7, (6, 8) et devient ensuite rapidement supérieur à 7,5. Le complexe absorbant est évidemment entièrement saturé dans tout le profil.

223 - Sols bruns calcaires

Tous ces sols ont été autrefois cultivés, donc fortement remaniés. Ils sont beaucoup moins riches en matière organique que les sols précédents. L'horizon A_1 ne dépasse jamais 10 cm. Il existe toujours du calcaire dès la surface mais en quantité très variable (la teneur en calcaire varie de 1 à 50 % en surface). Le pH est toujours supérieur à 7 dans tout le profil et peut parfois même dépasser 8 en A_1 . Le profil est toujours de type A (B) C.

224 - Sols bruns calcaires colluviaux

Ces sols sont très voisins des précédents, mais en différent par leur position topographique. Ils sont toujours situés dans des bas fonds sur des colluviums épais, et ont de ce fait des possibilités élevées d'alimentation en eau. La teneur en calcaire dès la surface est également variable (1 à 30 % de calcaire total).

III - COMPARAISON DES DIFFERENTES FORMES DE PHOSPHORE EN SOL CARBONATE ET EN SOL DECARBONATE

3I - Rappels bibliographiques

Nous allons tout d'abord rappeler quelques données générales sur les formes de phosphore dans le sol et leur évolution.

Le phosphore existe dans le sol sous deux grandes formes : il peut être sous forme organique ou sous forme minérale.

3II - Le phosphore minéral

Le phosphore minéral peut se trouver sous les formes suivantes:

- phosphore soluble dans l'eau, il constitue une très faible partie du phosphore minéral. Il comprend les phosphates alcalins (K et Na) et certains phosphates alcalino-terreux (phosphates monocalciques), ainsi qu'une faible partie des formes adsorbées en équilibre avec les solutions du sol.

- phosphore "lié" à l'aluminium et au fer.

Le phosphore peut être adsorbé sur le fer et l'aluminium échangeables liés au complexe absorbant. Il peut être également adsorbé sur les hydroxydes libres de fer et d'aluminium, ainsi que sur les hydroxydes de fer du complexe argile-humus-fer (BLANCHET 1959, WEY 1956, BARBIER, CHABANNES, MIALLET 1946). Le pouvoir adsorbant des hydroxydes est beaucoup plus élevé que celui de l'argile qui dépend rappelons le du fer et de l'aluminium échangeables (BLANCHET 1960).

De plus, les formes colloïdales des hydroxydes ferriques sont plus actives que les formes cristallisées (BLANCHET 1959).

Le phosphore peut également être bloqué sous forme de phosphates de fer et d'aluminium insolubles ou "emprisonnés" dans les formes cristallines et pseudocristallines des oxydes de fer et d'aluminium. Toutes les

formes de phosphore adsorbé sont en équilibre avec les solutions du sol et renouvellent, ainsi ces solutions qui sont appauvries par les prélèvements des végétaux. Les formes bloquées ne participent pas à ces échanges.

- phosphore "lié" au calcium.

dans les sols dépourvus de calcaire, le phosphore est adsorbé uniquement par le calcium du complexe absorbant. lorsqu'il existe du calcaire, une partie du phosphore "lié" au calcium est toujours adsorbée sur le calcium échangeable et une autre partie peut être adsorbée par le calcium des carbonates, en dehors de toute précipitation.

Toujours, en présence de calcaire, le phosphore peut être précipité par rétrogradation apatitique. Dans un prochain chapitre, nous allons étudier l'évolution des différentes formes de phosphore dans les sols calcaires.

- phosphore inclus dans les combinaisons minérales complexes. Le phosphore peut être inclus dans des combinaisons minérales complexes. Cette forme de phosphore constitue une réserve ne participant pas directement aux échanges avec les solutions du sol. Néanmoins, ce phosphore est très lentement "libéré" au fur et à mesure de l'altération des minéraux. Le phosphore insolubilisé par précipitation ou fixé par les colloïdes du sol (phosphore inclus sur la surface interne des molécules) ne participe pas aux échanges avec les solutions du sol. D'après DUCHAUFOR (1965), cette fixation n'est pas toujours irréversible. Les formes fixées ou précipitées seraient susceptibles de passer à nouveau sous forme échangeable sous l'action de diverses influences :

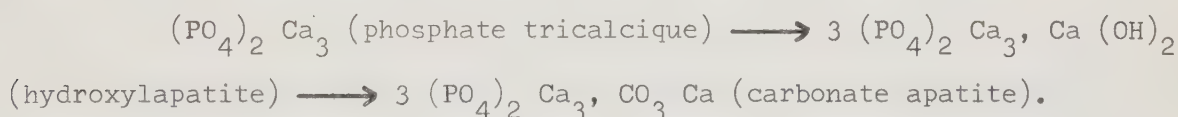
- . alternances d'humectation et de dessiccation des colloïdes
- . action des composés humiques adsorbés par les colloïdes minéraux.

L'importance des différentes formes de phosphore varie selon les types de sols. La quantité de phosphore est toujours en quantité faible,

mais peut devenir plus importante lorsque le sol devient plus alcalin. Dans les sols acides, le phosphore est essentiellement lié à l'aluminium et au fer. Néanmoins, dans les sols argileux contenant du carbonate de calcium, il peut également y avoir du phosphore lié à l'aluminium. Par contre dans ce type de sol, le phosphore lié au fer est pratiquement absent (BAERT, VAN DEN HENDE 1967). Dans les sols calcaires, le phosphore lié au calcium est la forme prédominante, mais cette forme existe également en sol acide. Dans les sols neutres, BARBIER, a montré que le phosphore lié au calcium représentait environ 30 % du phosphore minéral, le reste se trouvant lié à l'aluminium. Au contraire, BLANCHET, STUDER, CROUZET, CHAUMONT 1963, dans une étude sur les rendzines de Berry, ont montré que dans les sols calcaires 60 à 90 % du phosphore se trouvait sous forme liée au calcium.

312 - Evolution des différentes formes de phosphore lié au calcium dans les sols carbonatés

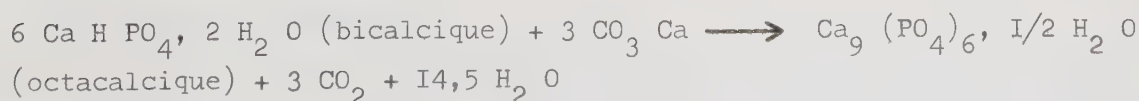
Dans les sols calcaires, la dynamique du phosphore est un problème extrêmement complexe. BOISCHOT, COPPENET, HEBERT 1949, ont montré que le phosphore pouvait être adsorbé sur les particules de carbonate de calcium. En milieu calcaire, lorsque le pH dépasse 8, il y a fixation du phosphore par rétrogradation apatitique : le phosphore prend une forme progressivement moins soluble et plus cristalline. Ce passage à des formes progressivement moins solubles peut se schématiser de différentes façons. D'après SCHOEN 1954, les ions H_2 du phosphate tricalcique hydraté dont la formule est la suivante $Ca_9 (PO_4)_6 H_2 (OH)_2$ sont remplacés par du calcium ; le terme ultime est une hydroxylapatite de formule $Ca_{10} (PO_4)_6 (OH)_2$. DUCHAUFOR (1965) donne le schéma suivant :



D'après les travaux d'ARVIEU (1967), de RADET (1957 et 1962), SCHOEN, BARBIER, HENIN 1964, BOISCHOT a donné un schéma de transformation du phosphate mono-calcique en hydroxylapatite. Nous en rappelons ici l'essentiel :

1 - Le phosphate mono-calcique lors de sa combinaison avec le calcaire donne un mélange de phosphate dicalcique, octacalcique, tricalcique et d'hydroxylapatite en proportions variables suivant le temps de contact.

2 - Le phosphate dicalcique n'est pas stable et évolue vers des formes plus riches en calcaire et moins solubles. Il se forme en particulier un phosphate intermédiaire, l'octacalcique, suivant la réaction :



3 - On peut admettre que le phosphate mono-calcique réagit ainsi en sol calcaire :

.../...

- . monocalcique + CO_3 Ca $\longleftrightarrow$ bicalcique (réaction très rapide)
- . bicalcique + CO_3 Ca $\longrightarrow$ octacalcique + monocalcique (terme intermédiaire)
- . octacalcique + CO_3 Ca $\longrightarrow$ tricalcique + bicalcique (terme final)

Les 2e et 3e réactions sont lentes et retardées par une baisse de température. L'abaissement du rapport Ca/P dans les phosphates intermédiaires d'après certains auteurs est dû à une adsorption de l'acide phosphorique à la surface de l'hydroxylapatite, et d'après d'autres cet abaissement du rapport Ca/P est expliqué en postulant l'absence de certains ions calcium, la neutralité électrique étant réalisée par des ions H^+ .

En résumé, des travaux récents montrent que la précipitation de l'acide phosphorique par le calcaire se fait par l'intermédiaire de phosphate à rapport Ca/P variable et dont la structure commence à être bien connue. Par exemple du phosphate dicalcique on passe au phosphate octacalcique puis au phosphate tricalcique et enfin à l'hydroxylapatite.

La précipitation des phosphates en milieu calcaire dépend de facteurs assez mal connus: sursaturation des solutions, équilibre instable, maturation des précipités, action d'ions complexants, etc... (BLANCHET, 1960, LINDSAY et STEPHENSON 1959).

RADET (1960) a montré que des apports d'engrais vert ralentissent la rétrogradation des réserves phosphatées du sol par formation d'humophosphate stable et dispersable dans les solutions du sol.

3I3- Phosphore organique

Le phosphore existe également sous forme organique dans l'humus du sol. Dans les sols riches en matière organique, cette forme peut constituer plus de la moitié du phosphore total (BAULE et FRICKER 1969).

Ce phosphore organique constitue une réserve de phosphore importante dans les sols ; ce phosphore devient progressivement assimilable grâce à l'intervention de micro-organismes. La minéralisation du phosphore organique dépend de l'activité biologique des sols. La libération de phosphore organique est lente dans les sols à faible activité biologique comme les mers et rapide pour les humus biologiquement actifs comme les mulls (DUCHAUFOR 1965).

En général, les horizons humifères supérieurs des sols sont enrichis en phosphore de façon notable par le jeu du cycle biologique qui ramène en surface les éléments puisés en profondeur par les racines. La quantité de phosphore organique présent dans les sols dépend des autres caractéristiques du sol. Par exemple, KARIM, KHAN 1955 sur les sols de l'Est du PAKISTAN ont montré que lorsque le pH du sol s'élève de 4,2 à 4,6 , la quantité de phosphore organique augmente ; la quantité de phosphore organique décroît ensuite quand le pH continue à monter de 4,6 à 5,6 puis augmente à nouveau lorsque le pH devient supérieur à 5,6.

JOHN, SPROUT, KELLEY 1965 ont montré qu'il existait une relation significative entre le phosphore organique d'une part et le pH, le phosphore total ainsi que le fer libre d'autre part, pour certains types de sols. De même, JACKMAN (1955) a montré qu'il existait une relation entre le phosphore organique et la teneur en phosphore total, la teneur en carbone et la capacité de fixation du phosphore minéral. Le rapport entre le carbone et le phosphore organique varie suivant les types de sols. Ce rapport C/P est important car la minéralisation du phosphore organique par les micro-organismes en dépend. On admet que le rapport C/P doit être inférieur à 200 pour que la minéralisation du phosphore soit possible (DUCHAUFOR 1965).

En résumé, le phosphore organique qui constitue une grande réserve de phosphore dans le sol est très important pour la nutrition phosphatée de la plante, bien qu'il ne participe pas directement à cette nutrition.

32 - Différentes formes de phosphore étudiées et méthodes employées

Nous avons comparé les diverses formes de phosphore entre 24 échantillons provenant de 5 profils de sols décarbonatés et 23 échantillons provenant de 5 profils de sols carbonatés. Les sols carbonatés comprennent une rendzine brunifiée humifère et 4 sols bruns calcaires. Les sols décarbonatés comprennent 3 sols lessivés, un sol brun lessivé et un sol brun. Nous avons comparé les huit formes de phosphore suivantes:

- phosphore soluble
- phosphore lié à l'aluminium
- phosphore lié au fer
- " lié au calcium * et au calcaire actif, pour sols carbonatés.
- " inclus dans les complexes de Fer
- " inclus dans les complexes d'aluminium
- " organique
- " total

Les six premières formes de phosphore ont été extraites et dosées suivant technique de CHANG et JACKSON (1958) modifiée en 1964 par HANOTIAUX. Le phosphore soluble est extrait par une solution de chlorure d'ammonium normale ;

* Nous entendons par phosphore lié au calcium, le phosphore lié au calcium échangeable pour les sols décarbonatés et pour les sols carbonatés le phosphore lié au calcium échangeable et au calcium des carbonates (calcaire total et actif).

... / ...

Le phosphore ainsi extrait comprend le phosphore soluble dans l'eau et le phosphore facilement échangeable (AUNG KHIN et LEEPER 1960, HANOTIAUX 1964). Le phosphore lié à l'aluminium est extrait par une solution de fluorure d'ammonium 0,5 N et de pH 8,5.

HANOTIAUX a en effet montré que le fluorure d'ammonium 0,5 N à pH7, utilisé normalement dans la méthode originale de CHANG et JACKSON, n'est pas un extracteur suffisamment sélectif entre le phosphore lié à l'aluminium et le phosphore lié au fer. En effet, 40% du phosphore lié au fer se dissolvent dans le fluorure d'ammonium à pH 7.

D'autre part, FIFE (1959) a montré que le phosphore lié à l'aluminium ne devient complètement soluble dans le fluorure d'ammonium qu'à pH 8,5. Le phosphore lié au fer est extrait par la soude 0,1 N. Le phosphore lié au calcium dans les sols décarbonatés est extrait par de l'acide sulfurique 0,5 N.

Dans les sols carbonatés nous avons effectué la même extraction à l'acide sulfurique 0,5 N. Mais en plus nous avons essayé d'évaluer la quantité de phosphore lié au calcaire actif. Pour cela, sur un deuxième échantillon nous avons effectué une extraction par l'acide sulfurique 0,5 N, en quantité juste nécessaire pour neutraliser le calcaire actif de l'échantillon.

Le phosphore inclus dans les complexes de fer a été extrait par une solution de citrate de sodium 0,3 M et de bicarbonate de sodium M contenant 1 g d'hyposulfite de sodium par 40 cc.

Le phosphore inclus dans les complexes d'aluminium a été extrait par une solution neutre de fluorure d'ammonium 0,5 N.

Le phosphore soluble, le phosphore lié au fer, le phosphore lié au calcium et le phosphore inclus dans les complexes de fer ont été dosés

par colorimétrie en milieu sulfurique. La colorimétrie a été effectuée par réduction du complexe phosphomolybdique par chlorure stanneux.

Le phosphore lié à l'aluminium et le phosphore inclus dans les complexes d'aluminium ont été dosés par colorimétrie en milieu chlorhydrique. La colorimétrie a été faite comme précédemment par réduction du complexe phosphomolybdique par le chlorure stanneux.

Dans certaines fractions, l'interférence du fer a été éliminée par addition d'acide borique avant colorimétrie.

Le phosphore organique a été dosé par la méthode SENGUPTA et CORNFIELD (1962) adaptée aux sols carbonatés. Sur 1 g de sol, nous avons effectué un prétraitement à l'acide acétique et à l'acide sulfurique 0,2 N pour éliminer tout le phosphore minéral. Le résidu a été minéralisé à 550° pendant 2 heures. Le phosphore a ensuite été extrait par de l'acide sulfurique 0,2 N. La colorimétrie a été faite après réduction du complexe phosphomolybdique par l'acide ascorbique.

Le phosphore total a été dosé suivant la méthode de DUVAL (1963) et (1964). Nous avons effectué une extraction nitroperchlorique sur 1 g de sol finement pulvérisé. La colorimétrie a été effectuée comme précédemment par réduction du complexe phosphomolybdique par l'acide ascorbique.

33 - Résultats et discussion

33I - Variations des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur.

La teneur en P_2O_5 est exprimée en ppm de terre fine (tableaux I et 2). Nous avons établi des graphiques de variations de la teneur des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur (figures n°1, 2, 3, 4).

TABLEAU 1 - DIFFERENTES FORMES DU PHOSPHORE DANS LES SOLS CARBONATES

Type de sol	Horizon	PHOSPHORE MINERAL P_{25} en p.p. m. de terre fine							P. orga- nique	P. Total
		P. soluble	P. Al	P. Fe	P. Ca	P. Cal actif	P. inclus Fe	P. inclus Al		
Rendzine brunifiée humifère	A1 A1/(B) (B)/C	17 13 3	53 18 18	66 18 10	76 170 186	0 2 97	224 237 164	51 36 35	561 652 564	1351 1472 1282
Station 3	C	2	16	3	218	118	46	12	40	433
Sol brun calcaire	A1 A1/(B) (B)	23 7 3	25 19 22	12 22 23	487 550 529	233 269 243	512 546 495	36 37 42	1111 1076 1116	2594 2576 2592
Station 22	11 A1/(B) 11 A1	5 4	30 32	19 17	585 559	266 266	705 718	50 47	1353 1580	3240 3458
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	8 5	86 30	22 19	432 349	4 53	468 409	51 51	971 618	2386 1752
Station 34	(B) (B)/C (B)/C	2 2 0	26 26 21	14 6 5	246 294 240	53 97 51	394 388 300	57 62 48	553 515 418	1541 1539 1257
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	23 10	38 13	16 14	270 264	135 99	281 217	27 20	664 508	1550 1217
Station 37	(B) (B)/C C	5 3 2	16 15 10	12 9 4	323 378 76	150 193 38	163 86 29	38 22 10	328 137 34	1058 756 184
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	7 3	16 12	14 8	327 262	27 124	198 95	52 21	386 109	1299 578
Station 41	(B)/C C	3 3	23 30	8 6	293 252	138 141	84 71	16 19	52 34	521 449

TABIEAU 2- DIFFERENTES FORMES DE PHOSPHORES DANS LES SOLS DECARBONATES

Type de sol	Horizon	PHOSPHORE MINERAL P_{25} en p.p. m. de terre fine						P. Orga- nique	P. Total
		P. soluble	P. Al	P. Fe	P. Ca	P. inclus Fe	P. inclus Al		
Sol lessivé Station <u>5</u>	A1 A1 A2 A2/(B) Bg	36 8 7 5 5	179. 62 36 70 66	235 290 163 370 353	115 110 82 127 91	309 287 180 303 281	18 34 12 50 50	751 385 300 379 269	1788 1191 790 1310 1168
Sol lessivé Station <u>6</u>	A1 A2 A2/B B B/C	32 10 10 8 12	117 36 87 80 455	175 150 307 349 1035	66 53 58 69 673	187 188 217 267 604	26 27 35 59 67	595 326 185 206 544	1488 962 1076 1237 3980
Sol lessivé Station <u>32</u>	A1 A2 B Bg C	16 6 3 3 2	174 42 47 81 38	322 163 221 436 449	87 78 53 108 553	234 206 238 295 389	28 41 60 81 84	744 412 288 311 458	1928 1178 1127 1786 2198
Sol brun lessivé Station †	A1 A2 B2 B3	10 7 4 8	50 53 13 16	94 103 102 130	61 66 70 67	209 192 171 208	23 27 51 64	366 140 131 153	1008 717 657 804
Sol brun Station <u>30</u>	A1 A1' A1(B) (B) (B)g	18 6 4 3 4	54 49 46 62 53	177 200 248 300 199	37 44 62 54 33	245 145 261 236 211	22 24 30 33 38	409 353 275 286 260	1122 927 980 985 813

FIG. 1-

Comparaison des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur dans les sols carbonatés et décarbonatés

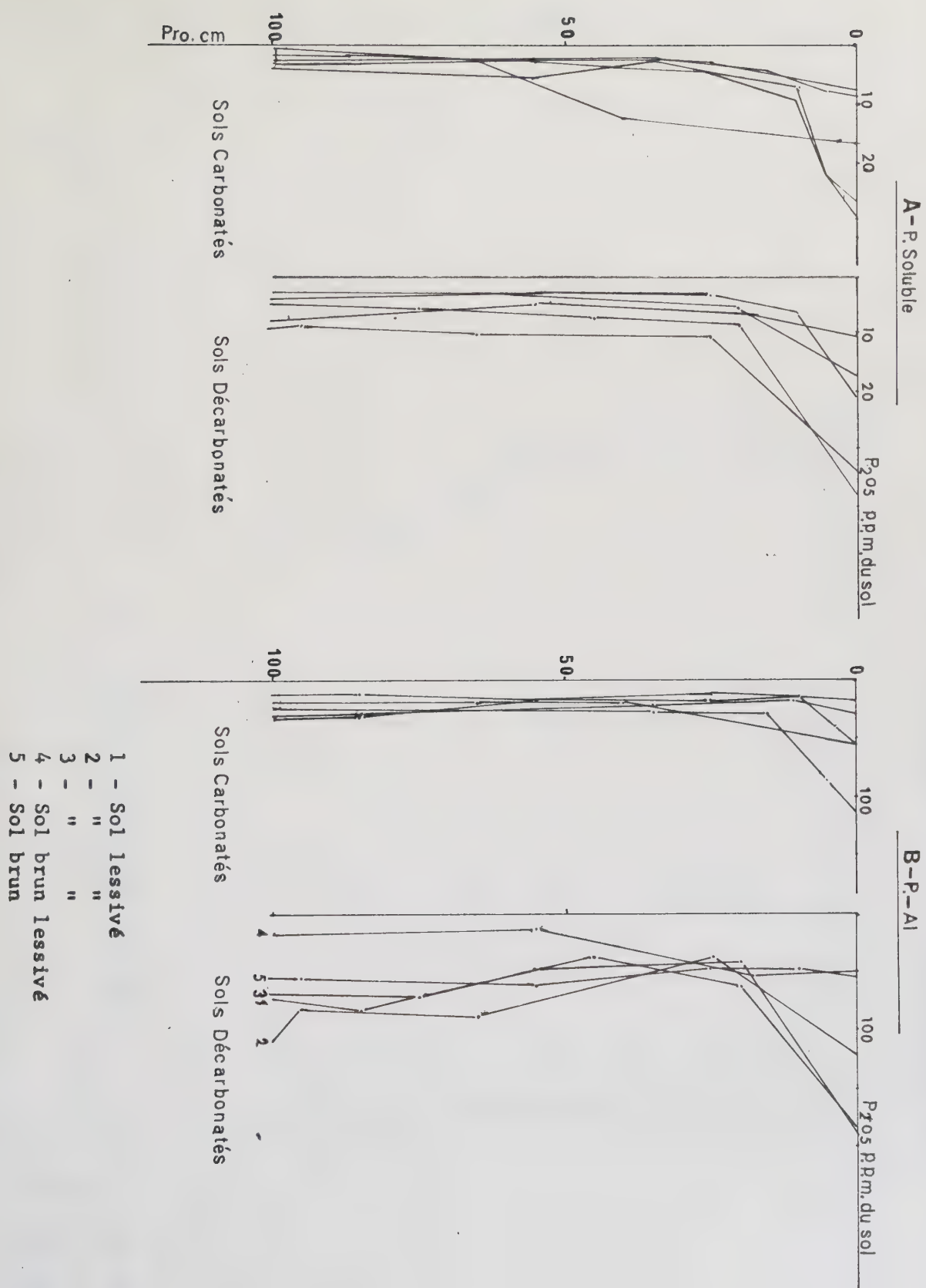
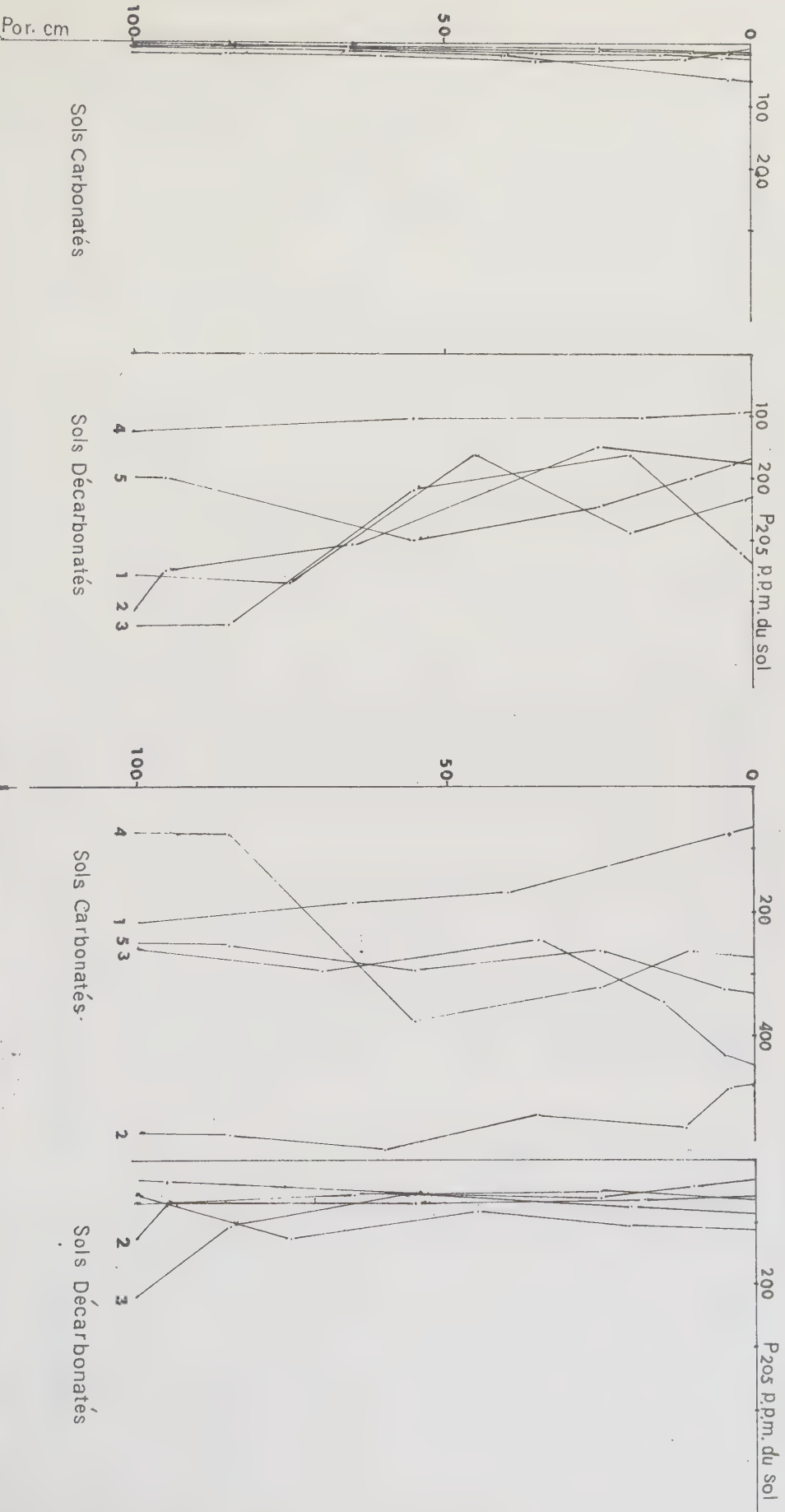


FIG. 2 - Comparison des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur dans les sols carbonatés et décarbonatés

C - P-Fe

D - P-Ca



- 1 - Rendzine brunifiée humide
- 2 - Sol brun calcaire
- 3 - " " " " "
- 4 - " " " " "
- 5 - " " " " "

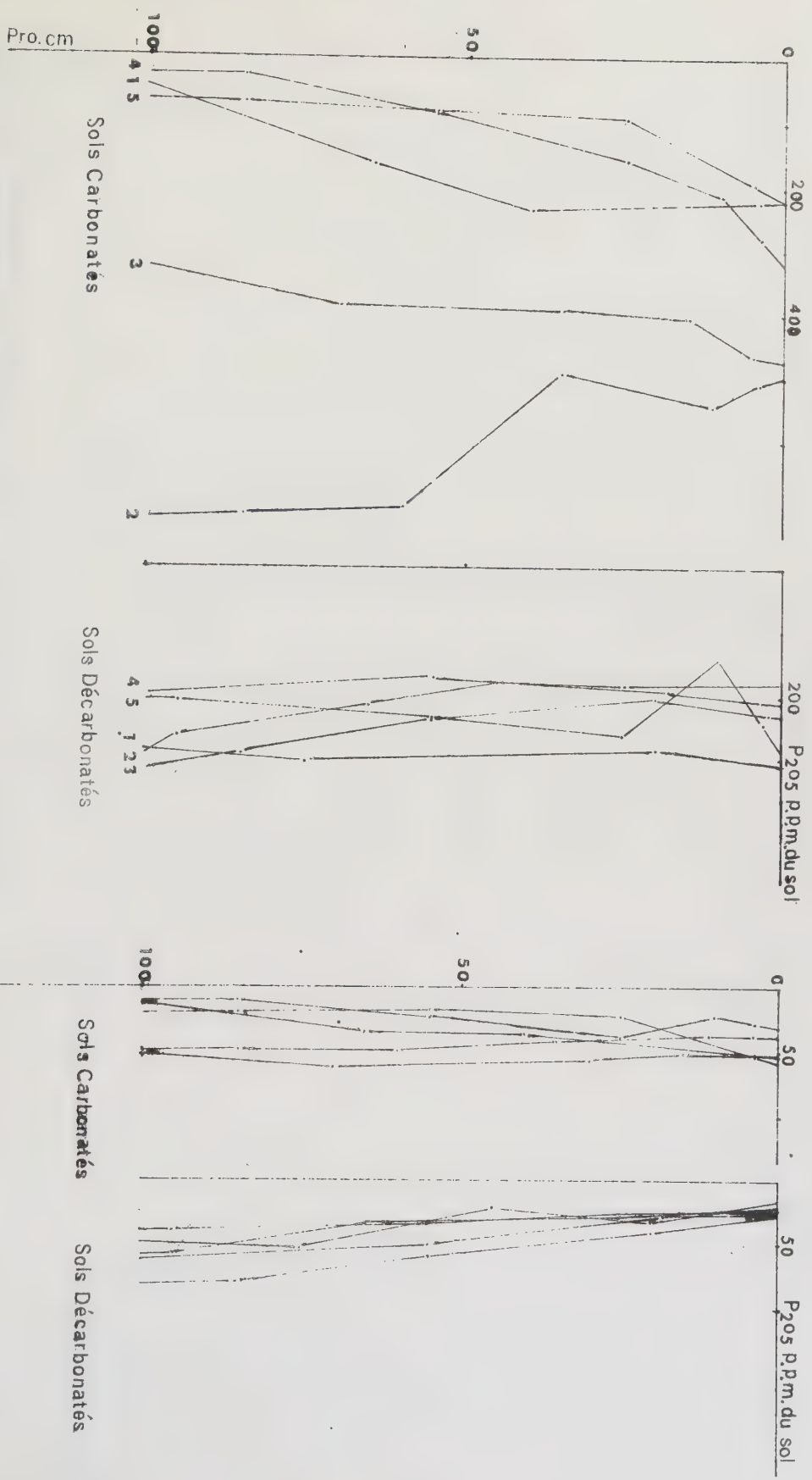
- 1 - Sol lessivé
- 2 - " " "
- 3 - " " "
- 4 - Sol brun lessivé
- 5 - Sol brun

FIG. 3-

Comparaison des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur dans les sols carbonatés et décarbonatés

E-P inclus Fe

F-P inclus Al



- 1 - Rendzine brunifiée humifère
- 2 - Sol brun calcaire
- 3 - " " "
- 4 - " " "
- 5 - " " "

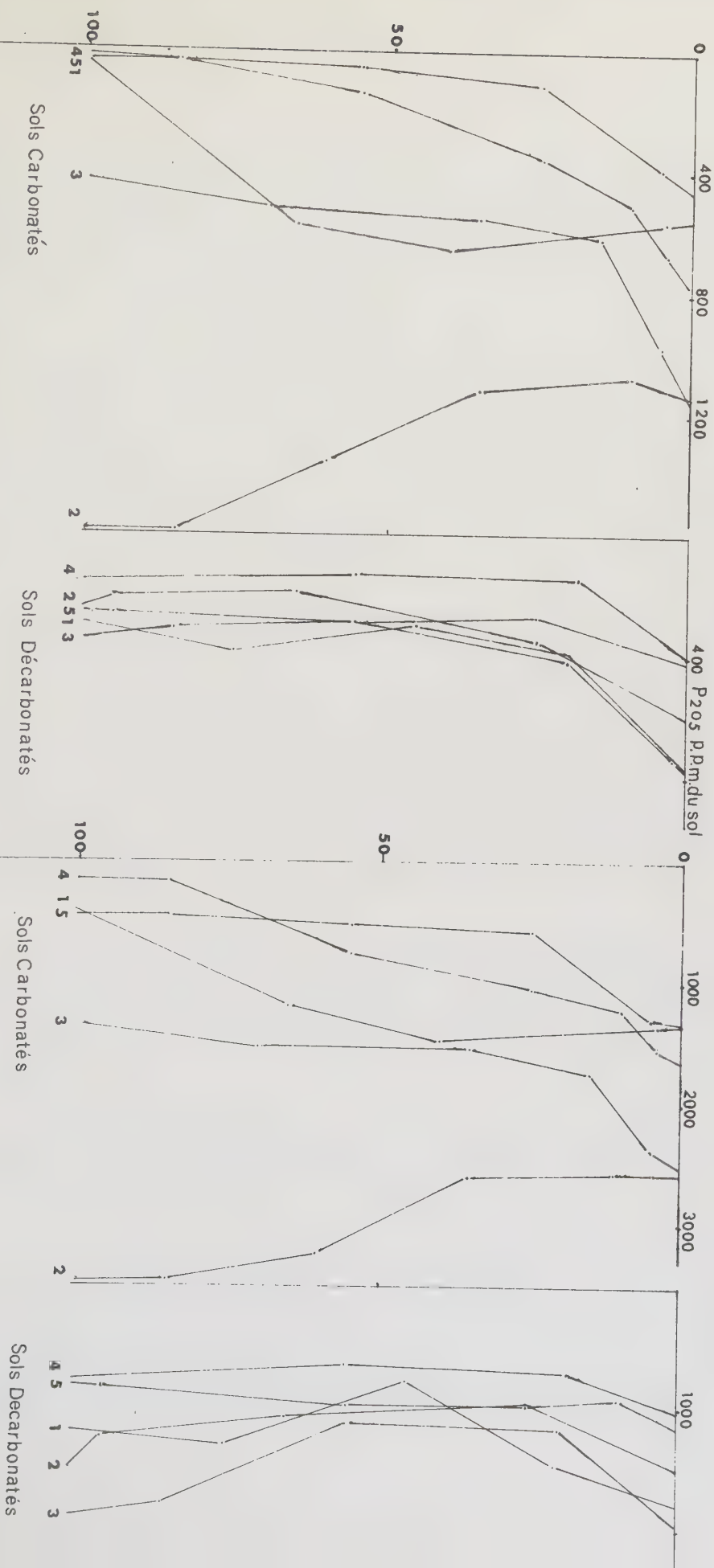
- 1 - Sol lessivé
- 2 - " " "
- 3 - " " "
- 4 - Sol brun lessivé
- 5 - Sol brun

Fig. 4 -

Comparaison des différentes formes de phosphore en fonction de la profondeur dans les sols carbonatés et décarbonatés

G - P. Organique

H - P. Total



1 - Rendzine brunifiée humifère
2 - Sol brun calcaire
3 - " " "
4 - " " "
5 - " " "

1 - Sol lessivé
2 - " "
3 - " "
4 - Sol brun lessivé
5 - Sol brun

1 - Nous constatons que le phosphore soluble est toujours en quantité très faible dans les deux types de sols. La qualité de phosphore soluble est un peu plus élevée dans les horizons supérieurs et reste constante dans le reste du profil.

Les calculs du coefficient de corrélation montrent qu'il existe une forte liaison entre le phosphore soluble et la teneur en matière organique du sol. Par contre, il n'y a aucune liaison entre le phosphore soluble et le calcium échangeable dans les sols non calcaires. Nous n'avons pas non plus trouvé de liaison entre le phosphore soluble et le calcaire actif dans les sols carbonatés.

2 - Phosphore lié à l'aluminium.

La teneur en phosphore lié à l'aluminium est beaucoup plus importante dans les sols décarbonatés que dans les sols carbonatés. Dans les sols carbonatés, la teneur en phosphore lié à l'aluminium est à peu près constante dans tout le profil. Par contre, dans les sols décarbonatés la variation de la teneur en phosphore lié à l'aluminium en fonction de la profondeur est différente selon le type de sol.

Dans les sols lessivés, la teneur en phosphore lié à l'aluminium passe par un minimum dans les horizons A_2 . Il semble donc bien qu'il y ait lessivage du phosphore lié à l'aluminium, comme il y a lessivage du fer et de l'argile.

Dans les sols bruns lessivés et bruns, la teneur en phosphore lié à l'aluminium est constante dans tout le profil.

Le calcul des coefficients de corrélations montre qu'il existe une liaison très significative entre le phosphore lié à l'aluminium et la teneur en matière organique du sol pour les sols décarbonatés. Pour les sols carbonatés, cette liaison est également significative, mais beaucoup moins élevée.

.../...

3 - Phosphore lié au fer.

Comme BAERT (1967) l'a montré, le phosphore lié au fer est pratiquement absent dans les sols carbonatés, alors qu'au contraire dans les sols acides, il constitue une fraction importante du phosphore.

Le phosphore lié au fer, comme le phosphore lié l'aluminium, passe par un minimum au niveau des horizons A₂. Il semble donc que le phosphore lié au fer soit également entraîné dans ce type de sol.

Dans les sols non calcaires, il existe une liaison significative entre la teneur en phosphore lié au fer et la teneur en argile du sol. Par contre, nous n'avons trouvé aucune liaison entre le phosphore lié au fer et la teneur en fer libre, quel que soit le type de sol.

4 - Phosphore lié au calcium.

Comme cela a déjà été montré par de nombreux auteurs, le phosphore lié au calcium constitue une part importante du phosphore dans les sols carbonatés. Dans nos échantillons, le phosphore lié au calcium constitue de 10 à 50 % de phosphore total.

Dans cette fraction, le phosphore lié au calcaire actif a une importance considérable. Il constitue de 0 à 30 % du phosphore total suivant les horizons et les types de sols. Dans les sols décarbonatés, le phosphore lié au calcium a une importance beaucoup moins grande. Dans les sols décarbonatés, nous avons trouvé une liaison significative entre le phosphore lié au calcium échangeable, comme cela est logique.

5 - Phosphore inclus dans les complexes de fer.

Cette forme de phosphore est en quantité plus importante dans certains sols carbonatés que dans les sols décarbonatés. De plus, dans les sols calcaires, cette forme est en quantité très variable, alors qu'elle est en quantité beaucoup plus constante dans les sols décarbonatés.

.../...

6 - Phosphore inclus dans les complexes d'aluminium.

Cette forme de phosphore est en quantité restreinte aussi bien dans les sols calcaires que dans les sols non calcaires. On notera que la quantité de phosphore inclus dans les complexes d'aluminium est à peu près constante en fonction de la profondeur dans les sols calcaires, alors que dans les décarbonatés elle a tendance à augmenter légèrement en profondeur.

7 - Phosphore organique

La répartition du phosphore organique suit la répartition de la matière organique et décroît rapidement en profondeur sauf pour un des sols carbonatés qui possède un horizon A₁ humifère enterré. Les sols calcaires sont en général un peu plus riches en phosphore organique que les sols non calcaires, probablement parce qu'ils sont plus riches en matière organique.

8 - Phosphore Total

Dans l'ensemble les sols carbonatés sont légèrement plus riches en phosphore total que les sols non carbonatés, au moins dans les 50 premiers centimètres. Dans les sols lessivés, on constate que le phosphore total passe par un minimum très net au niveau des horizons A₂.

Il semble bien qu'il y ait un entraînement d'une fraction importante de phosphore dans ces types de sols. Par contre, dans les sols bruns lessivés, cet entraînement est beaucoup moins important ; il devient pratiquement nul dans les sols bruns.

332 - Pourcentages des diverses formes de phosphore, par rapport au phosphore total, et comparaison de ces pourcentages en fonction des types de sols.

Comme nous l'avons déjà noté, le phosphore soluble est toujours en quantité restreinte (tableaux 3, 4 et figure 5) ; il représente moins

- 26 -
TABLEAU 3 - PROPORTION DES DIFFÉRENTES FORMES DU PHOSPHORE PAR RAPPORT AU PHOSPHORE TOTAL DANS LES SOLS CARBONATÉS

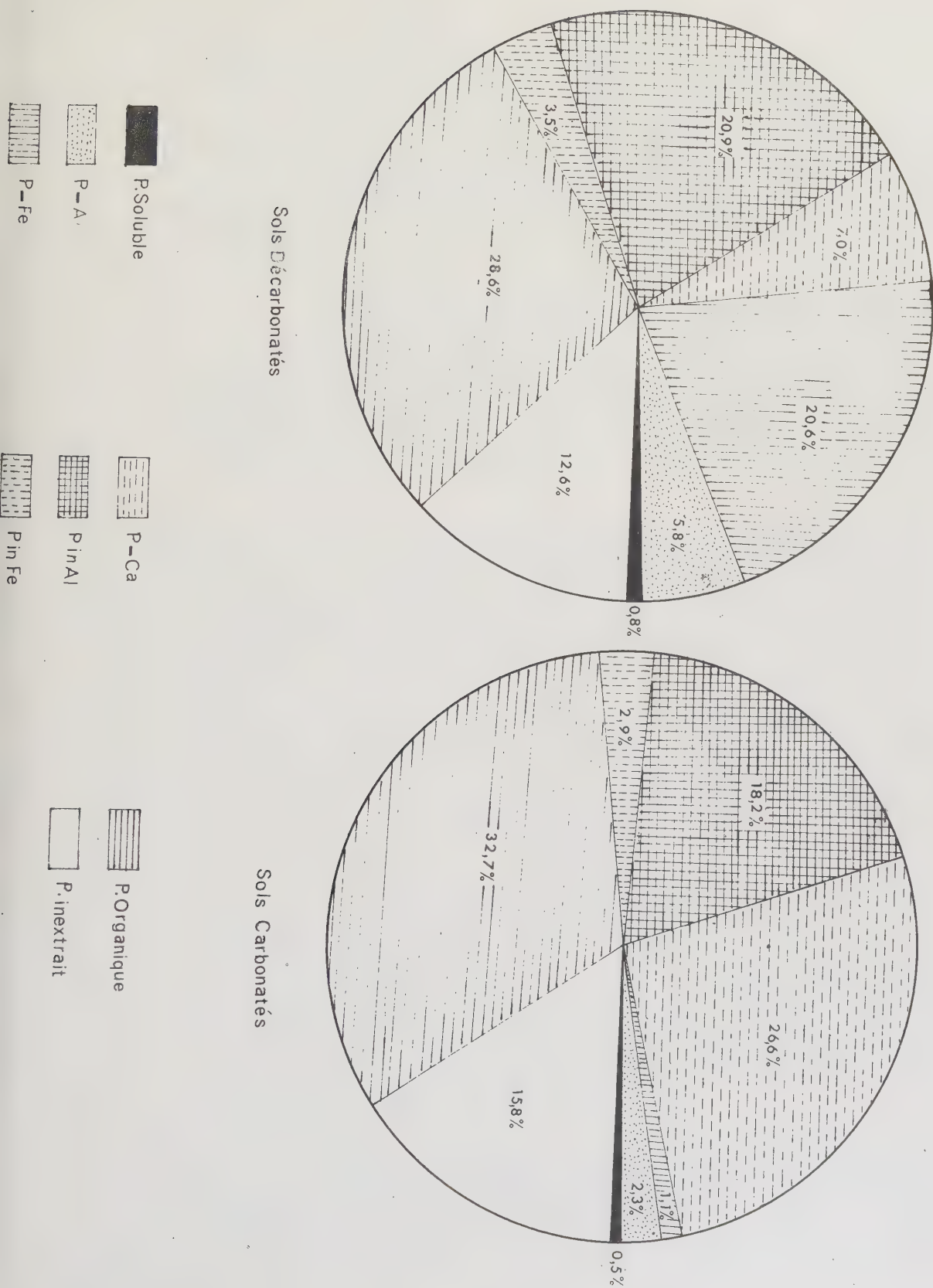
Type de sol	Horizon	PHOSPHORE MINÉRAL en % par rapport au phosphore total							P. organique % au P. Total	P. inextrait
		P. soluble	P. Al	P. Fe	P. Ca	P. Cal. actif	P. inclus Fe	P. inclus Al		
Rendzine brunifiée Humifère	A1 A1/(B) (B)/C	1,3 0,8 0,2	3,9 1,2 1,4	4,9 1,2 0,8	5,6 11,5 14,5	0,0 0,1 7,5	16,6 16,1 12,8	3,8 2,4 2,7	41,5 44,3 44,0	22,4 22,4 23,6
Station 3	C	0,5	3,7	0,8	50,2	27,2	10,7	2,9	9,2	22,0
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	0,9 0,3	0,9 0,7	0,5 0,9	18,8 21,4	9,0 10,5	19,7 21,2	1,4 1,4	42,8 41,8	15,0 12,3
Station 22	(B) 11A1/(B) 11 A1	0,1 0,2 0,1	0,8 0,9 0,9	0,9 0,6 0,5	20,4 18,0 16,2	9,4 8,2 7,7	19,1 21,8 20,8	1,6 1,5 1,4	43,1 41,8 45,7	14,0 15,2 14,4
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	0,3 0,3	3,6 1,7	0,9 1,1	18,1 19,9	0,2 3,0	19,6 23,3	2,1 2,9	40,7 35,3	14,7 15,5
Station 34	(B) (B)/C (B)/C	0,1 0,1 0,0	1,7 1,7 1,7	0,9 0,4 0,4	16,0 19,1 19,1	3,4 6,3 4,1	25,6 25,2 23,8	3,7 4,0 3,8	35,9 33,5 33,2	16,2 16,0 18,0
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	1,5 0,8	2,5 1,1	1,1 1,2	17,4 21,7	8,7 8,1	18,1 17,8	1,8 1,7	42,8 41,8	14,8 13,9
Station 37	(B) (B)/C C	0,4 0,4 1,0	1,5 2,0 5,4	1,1 1,2 2,0	30,5 50,1 40,9	14,2 25,5 20,5	15,4 11,4 15,5	3,6 2,9 5,4	31,0 18,2 18,6	16,5 13,9 11,2
Sol brun calcaire	A1 A1/(B)	0,5 0,5	1,2 2,1	1,1 1,4	25,2 45,3	2,1 21,4	15,2 16,4	4,0 3,7	29,7 18,8	23,1 11,7
Station 41	(B)/C C	0,5 0,7	4,3 6,7	1,5 1,3	56,2 56,2	26,6 31,4	16,1 15,8	3,1 4,2	9,9 7,7	8,3 7,4

TABLEAU 4 - PROPORTION DES DIFFÉRENTES FORMES DU PHOSPHORE PAR RAPPORT AU PHOSPHORE TOTAL DANS LES
SOLS DECARBONATES

Type de sol	Horizon	PHOSPHORE MINÉRAL en % par rapport au phosphore total						P. Organi- que % au	P. inex- trait
		P. soluble	P. Al	P. Fe	P. Ca	P. inclus Fe	P. inclus al		
Sol lessivé	A1	2,0	10,0	13,1	6,4	17,3	1,0	42,0	8,2
Station 5	A1	0,7	5,2	24,4	9,2	24,1	2,9	32,3	1,2
	A2	0,9	4,5	20,6	10,4	22,8	1,5	38,0	1,3
	A2/(B)	0,4	5,4	28,2	9,7	23,1	3,8	28,9	0,5
	Bc	0,4	5,6	30,3	7,8	24,1	4,3	23,0	4,5
Sol lessivé	A1	2,2	7,9	11,8	4,5	12,6	1,7	40,0	19,3
Station 6	A2	1,1	3,8	15,6	5,5	19,5	2,8	33,9	17,8
	A2/B	0,9	8,0	28,6	5,4	20,2	3,3	17,3	16,3
	B	0,7	6,5	28,2	5,6	21,6	4,8	16,6	16,0
	B/C	0,3	11,4	26,0	16,9	15,2	1,7	13,7	14,8
Sol lessivé	A1	0,8	9,0	16,7	4,5	12,1	1,5	38,6	16,8
Station 32	A2	0,5	3,5	13,8	6,6	17,5	3,5	34,9	19,7
	B	0,3	4,2	19,6	4,8	21,1	5,3	25,4	19,3
	Bc	0,2	4,6	24,4	6,0	16,5	4,5	14,4	26,4
	C	0,1	1,7	20,4	25,1	17,7	3,8	20,8	10,4
Sol brun lessivé	A1	1,0	5,0	9,4	6,1	20,8	2,2	36,4	19,7
Station 1	A2	0,9	7,4	14,4	9,3	26,8	3,8	19,5	17,9
	B2	0,7	1,9	15,6	10,7	25,9	7,7	19,9	17,6
	B3	1,0	2,0	16,2	8,4	25,9	8,0	19,0	19,5
Sol brun	A1	1,6	4,8	15,8	3,3	21,8	1,9	36,4	14,4
Station 20	A1'	0,7	5,3	21,6	4,7	15,7	2,6	38,0	11,4
	A1/(B)	0,4	4,7	25,3	6,3	26,6	3,0	28,0	5,7
	(B)	0,3	6,3	30,5	5,5	24,0	3,4	29,0	1,0
	(Bc)	0,5	6,6	24,5	4,1	25,9	4,7	32,0	1,7

FIG. 5 -

Représentation schématique des proportions des différentes formes de phosphore en sols carbonatés et en sols décarbonatés



de 1 % du phosphore total.

Le phosphore lié à l'aluminium constitue une fraction un peu plus importante, qui est de l'ordre de 5,8 % du phosphore total dans les sols décarbonatés et de 2,3 % du phosphore total dans les sols calcaires.

En proportion, le phosphore lié au fer est en quantité 20 fois plus importante dans les sols décarbonatés que dans les sols carbonatés. Dans les sols carbonatés, le phosphore lié au fer ne représente que 1,1 % en moyenne du phosphore total, alors que dans les sols décarbonatés il représente une moyenne près de 21 % du phosphore total..

Le phosphore lié au calcium devient beaucoup plus important dans les sols carbonatés, comme nous l'avons déjà dit précédemment. Cette forme de phosphore est de l'ordre de 26 % du phosphore total dans les sols carbonatés, alors qu'elle n'est plus que de 7 % dans les sols décarbonatés.

Dans ces deux types de sols, le phosphore organique constitue plus du tiers du phosphore total du sol. Dans les sols carbonatés, la proportion de phosphore organique est de près de 33 % alors qu'elle est de 28 % dans les sols décarbonatés.

Il faut maintenant noter que les différences entre la somme des diverses formes de phosphore et le phosphore total sont de 16 % pour les sols carbonatés et de 13 % pour les sols décarbonatés. Ces différences proviennent d'une part des erreurs analytiques et d'autre part du fait que les différents réactifs d'extraction n'extraient pas la quantité totale des formes de phosphore correspondantes.

Nous avons comparé les moyennes des teneurs des différentes formes de phosphore dans les sols carbonatés et les sols décarbonatés à l'aide du test T de Student. Seules trois formes présentent des différences

très significatives entre les deux types de sols : ce sont le phosphore lié au fer, le phosphore lié à l'aluminium et le phosphore lié au calcium (tableau 5).

Nous avons reporté sur un graphique à 3 axes les teneurs de ces trois formes de phosphore des 21 échantillons de sols. Nous voyons que la discrimination est parfaite entre les échantillons calcaires et les échantillons non calcaires (figure n°6).

Tableau 5 - COMPARAISON DES MOYENNES DES DIFFERENTES FORMES DE PHOSPHORE DANS LES SOLS CARBONATES ET DECARBONATES.

(Test T de Student)

	P. soluble	P-Al	P-Fe	P-Ca	P. Inclus Fe	P. Inclus Al	P. Organique	P. Total
T	1,4456	xx 3,0161	xxx 6,2415	xxx 5,4903	1,0699	0,5231	x 2,3393	1,1153

xxx = t significatif au risque 1 %

xx = t " " 1 %

x = t " " 5 %

.../...

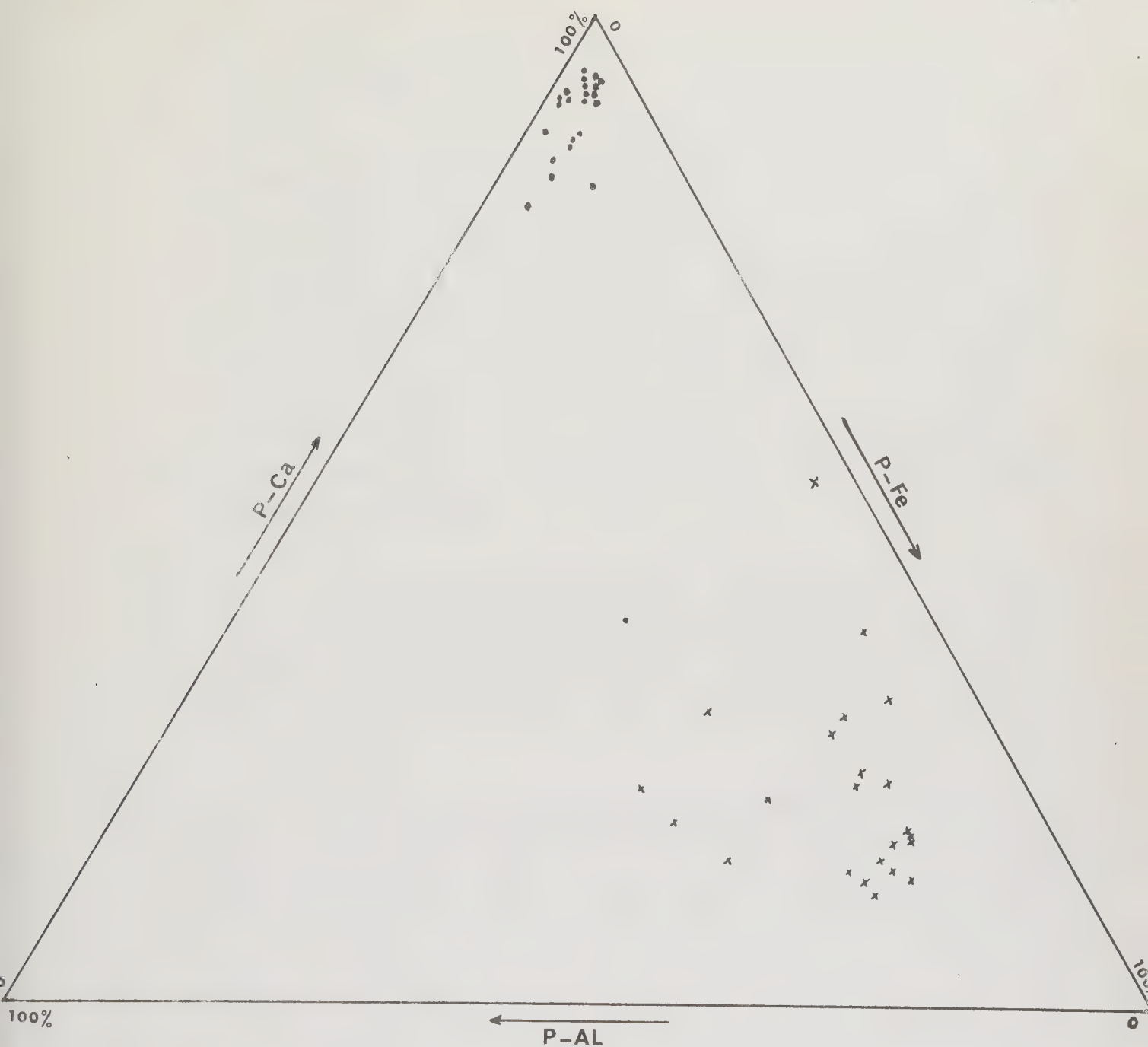


FIG.6.- Discrimination des échantillons calcaires et non calcaires en fonction des trois formes de phosphore :
Phosphore lié à l'Aluminium, Phosphore lié au fer, Phosphore lié au calcium

x - Echantillon Décarbonaté

● - Echantillon Carbonaté

34 - Conclusion

En conclusion, nous pouvons donc dire que seules trois formes de phosphore : le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore lié au fer et le phosphore lié au calcium différencient les sols décarbonatés des sols carbonatés. Les formes de phosphore liées au fer et à l'aluminium constituent une fraction importante du phosphore des sols décarbonatés. Au contraire, dans les sols carbonatés, le phosphore lié au calcium a une importance considérable et constitue en moyenne plus du quart du phosphore total. Dans ce phosphore lié au calcium, le calcaire actif joue un rôle non négligeable. Le phosphore inclus dans les complexes de fer et d'aluminium a une importance équivalente dans les sols carbonatés et les sols décarbonatés.

Le phosphore organique est plus important dans les sols carbonatés que dans les sols décarbonatés. Dans ce premier type de sol, il constitue environ un tiers du phosphore total. Dans les deux types de sol, le phosphore organique constitue une très grande réserve de phosphore du sol.

Dans les sols décarbonatés de type lessivé, il semble qu'il existe une migration du phosphore lié au fer et à l'aluminium. En effet, dans ce type de sol, ces deux formes de phosphore passent par un minimum dans les horizons A_2 et par un maximum dans les horizons d'accumulation.

IV - CORRELATION ENTRE LE PHOSPHORE EXTRAIT PAR LES HUIT METHODES ET LE NIVEAU DE NUTRITION

EN PHOSPHORE DE L'EPICEA.

4I - Introduction

D'après les résultats du chapitre précédent, dans les sols carbonatés, le phosphore lié au calcium et le phosphore lié au calcaire actif constituent une part importante du phosphore minéral. En outre, le phosphore organique constitue également une partie importante de la réserve phosphatée de ces sols. D'autre part, si le phosphore lié au fer et à l'aluminium ne constitue qu'une faible fraction du phosphore minéral des sols carbonatés, néanmoins il a un rôle non négligeable dans la nutrition phosphatée des plantes.

Nous avons donc essayé de comparer différentes méthodes d'extraction ; certaines de ces méthodes font appel à des réactifs d'extraction mixtes, extrayant à la fois le phosphore lié à l'aluminium et le phosphore lié au calcium. Nous avons également comparé des méthodes spécialement adaptées aux sols carbonatés. Ces méthodes adaptées aux sols calcaires diffèrent entre elles par leur spécificité vis-à-vis des différentes formes de phosphore lié au calcium. De plus, nous avons utilisé une méthode permettant le dosage exclusif du phosphore organique.

Les huit méthodes employées sont les suivantes:

- méthode DUCHAUFOUR - BONNEAU (extraction à l'acide sulfurique N/250 et à la soude N/10,
- méthode DUCHAUFOUR - BONNEAU modifiée,
- méthode FIEDLER (extraction à l'acide chlorhydrique concentré et chaud),

.../...

- méthode MOLLER et MOGENSEN (extraction à la résine : zéolithe de sodium),
- méthode JORET et HEBERT (extraction à l'oxalate d'ammonium 0,2 N),
- méthode JORET et HEBERT modifiée,
- méthode à l'acide sulfurique à concentration variable,
- méthode SEN GUPTA, CORNFIELD permettant de doser le phosphore organique.

42 - Description et principe des méthodes

42I - Méthode DUCHAUFOUR - BONNEAU

Cette méthode est utilisée depuis une dizaine d'années en FRANCE pour les sols forestiers. On procède à deux extractions successives : l'une à l'acide sulfurique N/250, l'autre à la soude N/10. L'acide sulfurique dissout les phosphates calciques, au moins les plus solubles et une partie du phosphore lié au fer. La soude diluée permet l'extraction totale des formes assimilables restantes : phosphate d'alumine et phosphate de fer. La soude dissout une grande partie de colloïdes humiques qui perturbent la colorimétrie. D'autre part, dans ces colloïdes humiques, il existe du phosphore organique. Or, diverses expériences ont montré que dans les sols acides, le phosphore organique ainsi extrait se minéralisait trop lentement pour pouvoir participer à la nutrition des plantes.

Par conséquent, pour ne doser que le phosphore minéral seul immédiatement assimilable, on élimine la plus grande partie de la matière organique dissoute. On précipite à cet effet les acides humiques par une faible quantité d'acide sulfurique dilué. Après centrifugation qui permet la séparation des acides humiques, on obtient un liquide qui contient encore un peu de matière organique sous forme d'acides fulviques de couleur jaune. Cette coloration ne gêne pas la colorimétrie lorsque celle-ci

est effectuée à 6600 Å dans le bleu, après réduction du complexe phosphomolybdique par le chlorure stanneux. (DUCHAUFOR - BONNEAU 1959).

422 - Méthode DUCHAUFOR - BONNEAU modifiée

Il nous a semblé que la méthode précédente ne représentait pas un pouvoir d'extraction suffisant vis-à-vis du phosphore lié au calcium, qui a une importance considérable dans les sols carbonatés, comme nous l'avons déjà montré.

Si la quantité d'acide sulfurique reste constante, quelle que soit la quantité de calcaire du sol, il est bien évident que dans les sols très riches en calcaire, l'acide sulfurique sert uniquement à attaquer une petite quantité de calcaire. Par conséquent, l'acide sulfurique dans ce type de sol ne peut extraire les autres formes de phosphore qu'il solubilise dans les sols non calcaires. Ainsi, une grande partie du phosphore échappe à l'extraction.

Cette remarque nous a amenés à modifier légèrement la méthode habituelle. Cette modification consiste à effectuer avant les deux extractions habituelles une première extraction supplémentaire avec de l'acide sulfurique N/25 ou N/50 en quantité juste nécessaire pour neutraliser le calcaire actif du sol, préalablement dosé. Nous pensons ainsi par ces 3 extractions successives mettre en solution tous les phosphores solubles et une partie ou la totalité du phosphore lié au calcaire actif.

Nous avons constaté que l'utilisation de quantité variables d'acide sulfurique ne modifie pas le pH de la solution d'extraction ; il a en effet neutralisation de l'acide par le calcaire. Il n'y a donc aucune incidence pour la colorimétrie qui, rappelons-le, doit être effectuée à pH constant.

.../...

423 - Méthode FIEDLER (extraction à l'acide chlorhydrique concentré et chaud.

Cette méthode n'a pas d'intérêt en agriculture car les plantes cultivées sont incapables d'assimiler toutes les formes de phosphore extrait par cette méthode brutale.

Cette méthode est surtout utilisée en ALLEMAGNE pour les sols forestiers et semble se généraliser à l'étranger. En FRANCE, nous venons seulement de commencer à utiliser cette méthode.

L'extraction se fait par de l'acide chlorhydrique à 25 % et à chaud. Tout le phosphore lié au calcium, la quasi totalité du phosphore lié au fer et à l'aluminium, la majeure partie du phosphore organique sont extraits par cette méthode : de plus, une partie du phosphore inclus dans des combinaisons complexes (silicates) qui sont détruites par l'acide chlorhydrique est probablement extraite. On ne connaît pas exactement dans quelle mesure, les différents silicates peuvent être détruits par ce traitement. Mais d'après LENTSCHIG (1964), il semble que les feldspaths alcalins, comme d'ailleurs la plupart des minéraux lourds, soient très résistants et ne subissent guère de modifications. Par contre, la néphéline est complètement détruite alors que les micas, en particulier la biotite, subissent une forte altération. L'extraction est faite par 100 ml d'acide chlorhydrique à 25 % pendant une heure et à l'ébullition. La silice est éliminée par dessiccation, passage à l'étuve à 120° puis traitement à l'acide perchlorique, concentré. Ce traitement à l'acide perchlorique permet également d'éliminer la coloration jaune due aux sels de fer, qui perturberait la colorimétrie. La colorimétrie est effectuée par le vanadomolybdate d'ammonium à 4400 Å.

424 - Méthode MOLLER et MOGENSEN (1962)

Cette méthode, souvent utilisée dans les pays nordiques, est basée sur un échange ionique entre une résine cationique (zéolithe de sodium) et les anions PO_4^{---} ou H_2PO_4^- et PO_4^{--} du sol. Cette méthode consiste à traiter le sol en suspension aqueuse avec la substance capable d'échange ionique saturée en ions monovalents (sodium).

La réaction entre la zéolithe de sodium et les phosphates difficilement solubles comme le phosphate tricalcique peut être schématisée de la manière suivante:



La réaction est fortement déplacée vers la droite lorsqu'on utilise un excès de zéolithe de sodium par rapport au sol. MOLLER et MOGENSEN ont montré que le déplacement de l'équilibre vers la gauche ne se produit à partir des sels en solution qu'au bout d'un temps relativement long. En conséquence, le phosphore assimilable sera quantitativement dosé sans qu'il y ait participation des formes non assimilables ou autre interférence, puisque les caractéristiques du sol restent par l'emploi de résines virtuellement inaltérées.

10 g de sol et 10 g de zéolithe de sodium sont agités pendant six heures dans 250 ml d'eau distillée. On laisse reposer pendant 12 heures, puis on effectue une coloration sur 10 cc de surnageant après centrifugation; la coloration se fait par réduction du complexe phosphomolybdique au chlorure stanneux.

425 - Méthode JORET, HEBERT (1955)

Cette méthode d'extraction qui convient aux sols calcaires est utilisée depuis longtemps en agronomie ; on procède à une extraction par l'oxalate d'ammonium 0,2 N à PH 7 ; le phosphore ainsi extrait est dosé

.../...

par dosage céruleomolybdique (DUVAL -1962) ; ce dosage est basé sur la réduction du complexe phosphomolybdique par une solution d'acide ascorbique. Par cette méthode on extrait les phosphates de calcium les plus solubles ; par contre, les phosphates de calcium dont la solubilité est inférieure à celle de l'oxalate de calcium, comme les carbonates apatites, ne sont pas extraits par cette méthode. Il semble que l'oxalate ait une action moins vigoureuse vis-à-vis des phosphates de fer que vis-à-vis des phosphates de calcium ; il est cependant probable qu'une partie du phosphore lié au fer est solubilisée par l'oxalate. Il semble également qu'une partie du phosphore lié à l'aluminium soit extraite. Le phosphore lié à l'humus passe également en solution dans l'oxalate d'ammonium dans les sols très riches en matière organique, ce qui est généralement le cas dans les sols forestiers. L'oxalate d'ammonium extrait une quantité importante de matière organique, ce qui donne à la solution d'extraction une coloration foncée. La colorimétrie est donc fortement perturbée et il est nécessaire d'opérer par colorimétrie différentielle.

426 - Méthode JORET - HEBERT modifiée

Les difficultés de colorimétrie provenant de la mise en solution d'une quantité importante de matière organique nous ont amenés à modifier légèrement la méthode JORET - HEBERT de la manière suivante : avant colorimétrie, nous effectuons sur le filtrat une attaque par de l'acide perchlorique au demi. Nous détruisons ainsi la matière organique qui est passée en solution dans l'oxalate d'ammonium et nous minéralisons le phosphore organique correspondant. Par cette méthode modifiée, nous devons donc en principe extraire une plus grande quantité de phosphore que par la méthode originale.

427 - Méthode à l'acide sulfurique à concentration variable

Cette méthode permet en principe de doser le phosphore lié au calcaire actif et la plus grande partie du phosphore soluble. Comme nous l'avons déjà montré, dans les sols carbonatés, le phosphore lié au calcaire actif

constitue une partie importante du phosphore minéral du sol ; d'autre part, comme l'ont montré JORET et HEBERT, le phosphore lié au calcaire actif intervient dans la nutrition phosphatée des plantes.

Nous procédons à une extraction sur 0,5 g de sol par 50 ml d'une solution d'acide sulfurique à concentration variable. La quantité d'acide sulfurique utilisée est calculée de façon à ce qu'il y ait neutralisation exacte du calcaire actif du sol. Cette méthode constitue aussi la première partie de la méthode DUCHAUFOUR et BONNEAU modifiée, mais dans ce cas le dosage du phosphore a été effectué directement.

428 - Méthode de SEN GUPTA et CORNFIELD (1962)

Cette méthode adaptée aux sols calcaires ne permet que le dosage du phosphore organique (se référer au chapitre précédent).

43- Résultats et discussion

Les résultats obtenus sur les 21 profils de sols carbonatés avec les huit méthodes d'extraction sont consignés dans le tableau 6 avec les résultats des analyses foliaires.

Nous voyons que le niveau de nutrition en phosphore de l'épicéa sur ces 21 stations est très variable. En effet, la teneur en phosphore des aiguilles d'épicéa varie de 0,20 à 0,50 % de P_2O_5 , par conséquent d'un niveau extrêmement faible à un niveau très élevé

Nous avons cherché à mettre en évidence une liaison pouvant exister entre le niveau de nutrition en phosphore de l'épicéa et le phosphore du sol extrait par les 8 méthodes, en procédant de deux manières différentes. Nous avons effectué les calculs des coefficients de corrélation en exprimant les teneurs en phosphore du sol d'une part en concentration (en %) et d'autre part en gramme par volume de sol

.../...

TABLEAU 6 - NIVEAU DE NUTRITION EN P2 O5 DE L'EPICEA ET RESULTATS DES HUIT METHODES D'EXTRACTION DU PHOSPHORE SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS.

1 - Méthode DUCHAUFOR, BONNEAU (H2 SO4 N/250 + NaOH N/10
 11 - " " modifiée
 111 - " FIEDLER (Hcl concentré et chaud)
 1V - " MOLLER, MOGENSEN (Zéolithe de sodium)
 V - " JORET, HEBERT (oxalate d'ammonium)
 VI - " " modifiée
 VII - " Acide sulfurique à concentration variable
 VII1 - " SEN GUPTA, CORNIFIELD (P. organique)

Placette	Type de sol	Horizon	P ₂ O ₅ du sol extrait par les huit méthodes exprimé en %.								P ₂ O ₅ des aiguilles exprimé en %
			Méth. 1	11	111	1V	V	VI	VII	VII1	
3	Rendzine brunifiée humifère	A1 A1/(B) (B)/C C	0,080 0,050 0,060 0,040	0,090 0,065 0,080 0,045	1,417 1,350 1,283 0,692	0,025 0,019 0,023 0,098	0,031 0,016 0,014 0,015	0,089 0,038 0,038 0,030	0,015 0,010 0,010 0,015	0,561 0,653 0,565 0,040	0,30
4	Brun calcaire colluvial	A1 A1/C (B)/C Cg	0,070 0,020 0,050 0,050	0,070 0,040 0,060 0,085	2,750 2,817 2,208 1,408	0,074 0,023 0,015 0,089	0,028 0,015 0,012 0,011	0,148 0,054 0,030 0,028	0,030 0,005 0,000 0,000	1,115 0,745 0,994 0,286	0,28
7	Brun calcaire	A1 A1/C 1C 11 C 111 C	0,400 0,140 0,150 0,090 0,070	0,563 0,402 0,424 0,130 0,106	3,008 2,733 2,958 1,025 1,358	0,175 0,093 0,143 0,044 0,074	0,324 0,263 0,280 0,060 0,044	0,420 0,315 0,320 0,087 0,064	0,285 0,155 0,162 0,008 0,006	1,042 0,828 0,779 0,619 0,329	0,40
12	Brun calcaire colluvial	A1 B1 B2 (B)/C	0,070 0,050 0,050 0,060	0,110 0,060 0,060 0,070	1,475 1,083 1,250 1,308	0,074 0,000 0,000 0,000	0,017 0,006 0,008 0,005	0,071 0,038 0,040 0,030	0,025 0,008 0,010 0,005	0,664 0,374 0,493 0,564	0,30
16	Rendzine humifère (type)	AO A1 A1' A1'' C	0,080 0,020 0,030 0,020 0,020	0,133 0,040 0,050 0,040 0,030	1,417 1,850 1,617 1,133 0,133	0,137 0,034 0,026 0,014 0,016	0,019 0,009 0,007 0,006 0,006	0,264 0,091 0,064 0,044 0,023	0,093 0,025 0,030 0,030 0,027	0,814 0,787 0,744 0,552 0,015	0,21

TABLEAU 6 - (suite)

Placette	Type de sol	Horizon	P ₂ O ₅ du sol extrait par les huit méthodes exprimé en %								P ₂ O ₅ des analyses exprimé en %
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
17	Rendzine humifère (type)	AO AO A1 A1' A1/C	0,040 0,030 0,030 0,020 0,020	0,148 0,138 0,065 0,035 0,040	1,308 1,308 1,725 1,542 1,750	0,160 0,104 0,032 0,023 0,012	0,023 0,019 0,009 0,007 0,008	0,266 0,222 0,087 0,054 0,067	0,101 0,082 0,050 0,030 0,040	1,004 0,813 0,848 0,722 0,907	0,29
20	Brun calcaire	A1 A1/(B) (B) C C	0,070 0,030 0,040 0,030 0,060	0,126 0,105 0,115 0,100 0,095	2,000 1,758 1,842 1,008 0,942	0,074 0,075 0,081 0,157 0,165	0,027 0,024 0,022 0,020 0,023	0,097 0,087 0,047 0,044 0,057	0,045 0,040 0,035 0,067 0,060	1,050 0,996 0,795 0,046 0,009	0,28
21	Brun calcaire	A1 A1/(B) (B) 11A1/(B) 11 A1	0,070 0,030 0,040 0,030 0,060	0,123 0,119 0,108 0,135 0,137	2,708 2,583 2,550 2,833 3,075	0,053 0,047 0,033 0,034 0,039	0,038 0,029 0,015 0,027 0,035	0,094 0,067 0,036 0,062 0,080	0,053 0,025 0,018 0,018 0,022	1,208 1,082 1,082 1,377 1,445	0,35
22	Brun calcaire	AO A1 A1/(B) (B) 11A1/(B) 11 A1	0,080 0,060 0,040 0,030 0,050 0,040	0,370 0,120 0,084 0,088 0,095 0,077	2,925 2,000 1,983 2,325 3,233 3,275	0,338 0,079 0,049 0,031 0,047 0,048	0,080 0,033 0,030 0,024 0,035 0,031	0,422 0,118 0,076 0,055 0,067 0,062	0,290 0,064 0,051 0,029 0,035 0,028	1,214 1,110 1,076 1,117 1,354 1,580	0,39
27	Rendzine humifère (type)	A1 A1' (B)/C C	0,100 0,040 0,020 0,000	0,108 0,055 0,040 0,035	2,267 1,700 0,517 0,283	0,071 0,020 0,033 0,028	0,020 0,014 0,013 0,015	0,123 0,019 0,019 0,028	0,028 0,015 0,010 0,010	1,203 0,684 0,124 0,039	0,29
33	Brun calcaire colluvial	A1 A1/(B) (B) 11 A1/(B) 11 A1	0,240 0,120 0,040 0,080 0,100	0,882 0,282 0,262 0,311 0,516	3,867 2,358 1,958 2,508 2,983	0,266 0,135 0,061 0,095 0,190	0,214 0,149 0,062 0,078 0,143	0,575 0,194 0,090 0,118 0,166	0,530 0,098 0,040 0,044 0,104	1,030 0,825 0,561 0,641 0,645	0,49

TABLEAU 6 - (suite)

Placette	Type de sol	Horizon	P ₂ O ₅ du sol extrait par les huit méthodes exprimé en %.								P ₂ O ₅ des aiguilles exprimé en %
			1	11	111	1V	V	VI	VII	VIII	
34	Brun calcaire colluvial	A1 A1/(B) (B) (B)/C (B)/C	0,090 0,040 0,030 0,030 0,020	0,095 0,050 0,040 0,045 0,035	2,355 1,655 1,455 1,565 1,175	0,076 0,031 0,019 0,017 0,022	0,090 0,035 0,027 0,023 0,019	0,166 0,083 0,074 0,067 0,055	0,010 0,000 0,000 0,000 0,000	0,971 0,619 0,553 0,515 0,418	0,45
37	Brun calcaire	A1 A1/(B) (B) (B)/C C	0,080 0,065 0,040 0,010 0,020	0,105 0,075 0,055 0,045 0,038	1,500 1,030 1,160 0,775 0,155	0,071 0,039 0,027 0,034 0,008	0,027 0,019 0,008 0,010 0,004	0,128 0,071 0,026 0,031 0,000	0,015 0,008 0,005 0,005 0,006	0,664 0,508 0,328 0,137 0,035	0,45
38	Rendzine humifère (type)	A1 A1' C C	0,080 0,090 0,020 0,040	0,266 0,235 0,177 0,095	2,185 2,180 2,040 1,325	0,114 0,253 0,550 0,436	0,043 0,020 0,017 0,015	0,131 0,052 0,045 0,045	0,186 0,155 0,117 0,090	0,854 0,453 0,109 0,071	0,39
40	Rendzine humifère (type)	A0 A1 A1' A1/(B) C	0,110 0,040 0,030 0,040 0,020	0,235 0,060 0,050 0,050 0,030	2,430 1,815 1,950 1,405 0,850	0,111 0,050 0,042 0,048 0,220	0,037 0,023 0,024 0,023 0,021	0,204 0,095 0,069 0,053 0,040	0,153 0,022 0,015 0,020 0,012	1,157 0,974 0,910 0,610 0,098	0,41
41	Brun calcaire	A1 A1/(B) (B)/C C	0,050 0,040 0,030 0,030	0,064 0,060 0,053 0,048	1,300 0,585 0,500 0,440	0,106 0,105 0,097 0,058	0,024 0,012 0,022 0,017	0,069 0,031 0,060 0,038	0,020 0,010 0,008 0,005	0,387 0,109 0,052 0,034	0,29
42	Brun calcaire	A1 A1/(B) (B) (B)/C	0,050 0,055 0,020 0,030	0,083 0,060 0,030 0,035	1,335 1,380 1,270 0,845	0,058 0,048 0,020 0,020	0,032 0,016 0,010 0,012	0,065 0,045 0,033 0,039	0,020 0,010 0,005 0,000	0,645 0,586 0,527 0,412	0,37
43	Brun calcaire	A1 A1/(B)	0,105 0,060	0,156 0,085	2,135 2,030	0,058 0,031	0,048 0,036	0,138 0,088	0,020 0,008	0,687 0,544	0,41

TABLEAU 6 - (suite et fin)

Placette	Type de sol	Horizon	$P_{25}^{O_5}$ du sol extrait par les huit méthodes exprimé en %								$P_{25}^{O_5}$ des aiguilles exprimé en %
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
43	Brun calcaire	(B) (B)	0,070 0,073	0,097 0,093	1,944 1,379	0,013 0,000	0,034 0,014	0,069 0,031	0,007 0,005	0,493 0,332	0,50
44	Brun calcaire colluvial	A1 A1/(B) (B) (B) (B)/C (B)/C	0,077 0,047 0,058 0,040 0,045	0,114 0,100 0,095 0,060 0,065	1,520 1,805 1,530 1,335 1,275	0,043 0,031 0,002 0,000 0,000	0,037 0,036 0,023 0,010 0,010	0,123 0,079 0,040 0,031 0,033	0,012 0,010 0,005 0,005 0,005	0,788 0,639 0,493 0,389 0,384	
83	Brun calcaire	A1 (B) (B) (B)/C C	0,075 0,040 0,030 0,020 0,000	0,070 0,045 0,035 0,025 0,060	2,100 1,600 1,500 0,825 0,750	0,019 0,000 0,005 0,055 0,211	0,018 0,009 0,012 0,015 0,011	0,100 0,055 0,050 0,021 0,021	0,010 0,010 0,005 0,005 0,015	0,850 0,584 0,555 0,195 0,048	0,30
85	Brun calcaire	A1 A1/(B) (B) C Ca	0,070 0,080 0,060 0,050	0,172 0,128 0,110 0,080	2,050 1,885 1,380 1,360	0,101 0,088 0,062 0,058	0,153 0,130 0,089 0,038	0,221 0,143 0,098 0,040	0,072 0,040 0,024 0,024	0,705 0,481 0,220 0,098	

constant (tranche de sol de 25 cm d'épaisseur et de 1 m² de surface),

43I - Corrélation entre $P_2 O_5$ des aiguilles et $P_2 O_5$ du sol exprimé en %

Dans un premier temps, nous avons divisé les profils en 4 séries d'horizons :

- les horizons A1
- les horizons situés immédiatement sous les horizons A1
- les horizons de profondeur moyenne
- les horizons situés en forte profondeur.

Les résultats des calculs des coefficients de corrélation sont consignés dans le tableau 7. Nous constatons que pour les horizons A1, il existe des liaisons significatives entre le phosphore des aiguilles et 3 méthodes qui sont la méthode à $H_2 SO_4$ et NaOH modifiée (méthode 2), la méthode JORET, HEBERT (méthode 5), la méthode JORET - HEBERT modifiée (méthode 6).

Pour les horizons situés immédiatement sous les horizons A1, une seule méthode présente une liaison significative avec le niveau de nutrition du phosphore de l'épicéa : c'est la méthode $H_2 SO_4$ et NaOH non modifiée (méthode 1). On notera cependant que 3 autres méthodes, les méthodes 2, 5 et 6, bien qu'elles n'aient pas de coefficient de corrélation significative, ne sont cependant pas loin du seuil de signification au risque de 5 %.

Pour les horizons situés à une profondeur moyenne, nous constatons qu'il n'existe aucune corrélation significative entre le phosphore des aiguilles et le phosphore extrait par les différentes méthodes.

Enfin, pour les horizons profonds, seules 2 méthodes donnent des résultats significatifs : ce sont les méthodes JORET - HEBERT et

.../...

TABLEAU 7 - COEFFICIENTS DE CORRELATIONS ENTRE $P_2 O_5$ des AIGUILLES ET $P_2 O_5$ du sol exprimé en %.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Horizon A_1		+			+	+		
" situés immédiatement sous A_1	0,3594	0,4549	0,2929	0,3851	0,4334	0,4373	0,3894	0,0728
Horizons de profondeur moyenne	++							
	0,5084	0,4018	0,2160	0,2708	0,4034	0,4048	0,2115	0,0084
Horizons situés en forte profondeur								
	0,2712	0,3664	0,3073	0,1639	0,2498	0,2395	0,1217	0,0555
					+	+		
	0,3670	0,4106	0,4071	0,0567	0,4810	0,4750	0,0694	0,2236

d.d.l. = 19

++ = significatif au risque 2%
+ = " " " 5%

JORET - HEBERT modifiée, on notera encore que la méthode 2 ($H_2SO_4 + NaOH$) modifiée n'est pas loin du seuil de signification.

Aucune méthode par conséquent ne présente systématiquement de liaison significative avec le niveau de nutrition en phosphore des aiguilles, quels que soient les horizons. Néanmoins, dans l'ensemble, on peut dire que c'est avec les horizons supérieurs que l'on obtient les résultats les plus significatifs. Ceci peut être dû à deux faits: l'épicéa peut s'alimenter de manière préférencielle dans les horizons supérieurs et, d'autre part, par le jeu du cycle biologique, il peut y avoir accumulation de phosphore en surface, soit en phosphore organique, soit en phosphore minéral par décomposition de cette matière organique.

432 - Corrélation entre phosphore des aiguilles et phosphore exprimé en poids par volume de sol

Pour exprimer le phosphore en poids par volume de sol, nous avons fait intervenir la densité apparente du sol et le pourcentage de cailloux (résultat, voir annexe III).

432I - Corrélation par tranche de sol

Nous avons divisé les profils de sols en tranches successives de 25 cm d'épaisseur et nous avons calculé les coefficients de corrélation existant entre le phosphore des aiguilles et chacune de ces tranches de sol d'épaisseur constante. Les résultats sont consignés dans le tableau 8.

Nous constatons qu'aucune méthode ne présente de corrélation significative avec le phosphore des aiguilles de l'épicéa, sauf pour la tranche de sol comprise entre 75 et 100 cm, où la seule méthode JORET-HEBERT modifiée donne des résultats significatifs. Il semble donc que la concentration soit plus importante que la quantité totale de phosphore.

.../...

TABLEAU 8 - COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE P_2O_5 des AIGUILLES DU SOL EXPRIME EN POIDS
PAR VOLUME DE SOL - PAR TRANCHE DE SOL

	1	11	111	1V	V	V1	V11	V111
1ère tranche 0 - 25 cm	0,2931	0,3937	0,0918	0,2613	0,2770	0,3152	0,2690	0,0971
2ème " 25 - 50 cm	0,1602	0,3302	0,1992	0,1203	0,2259	0,2251	0,1504	0,0090
3ème " 50 - 75 cm	0,1081	0,3576	0,1852	0,0799	0,2348	0,2481	0,1661	0,0199
4ème " 75 -100 cm	0,2479	0,4386	0,2628	0,0836	0,4529	0,4850 ⁺	0,1772	0,0526

1ère et 2ème tranche d.d.l. = 19

3ème " d.d.l. = 17

4ème " d.d.l. = 15

+ = significatif au risque 5%

Cela n'est pas étonnant : en effet, pour un même volume et une même concentration en phosphore, un horizon contiendra d'autant plus de phosphore que sa densité apparente sera forte. Or, une augmentation de la densité apparente empêche la prospection des racines (LEVY 1967).

Nous avons également effectué des calculs pour la tranche supérieure de 10 cm. Les résultats sont significatifs avec 2 méthodes seulement (Tableau 9) : la méthode 2, c'est-à-dire la méthode $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée et la méthode 6, méthode JORET - HEBERT modifiée. Ces résultats confirment ceux du chapitre précédent (prospection préférentielle par les racines des horizons supérieurs, ou influence du jeu du cycle biologique).

4322 - Corrélation pour l'ensemble du profil

Nous avons calculé pour chaque profil la quantité totale de phosphore contenu dans un volume de sol calculé à partir d'une surface de 1 m² et de la profondeur maximale de prospection par les racines.

Dans ce calcul, nous avons tenu compte de la densité apparente et du pourcentage de cailloux de chacun des horizons. Les résultats sont consignés dans le tableau 10 et montrent qu'il existe une liaison assez significative (risque de 2 %) entre la nutrition en phosphore de l'épicéa et le phosphore extrait par la méthode 2. Il existe également une liaison un peu moins significative avec la méthode JORET - HEBERT modifiée (risque 5 %).

Ces résultats sont intéressants car ils montrent que l'épicéa ne s'alimente pas de manière préférentielle à partir d'un seul horizon, mais à partir de l'ensemble du profil. L'épicéa, malgré sa réputation d'avoir un enracinement traçant, peut en effet avoir des racines fines dans les horizons profonds si la structure est favorable (LEVY 1967). Les résultats significatifs obtenus dans le chapitre précédent avec les horizons supérieurs sont donc plus à attribuer à l'action du cycle biologique qu'à une alimentation préférentielle à partir de ces horizons supérieurs.

TABLEAU 9- COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE $P_{25}O_5$ des aiguilles et $P_{25}O_5$ DU SOL EXPRIME EN
POIDS PAR VOLUME DE SOL - POUR TRANCHE SUPERIEURE DE 10 cm

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Tranche supérieure de 10 cm	0,3321	+	0,2405	0,4019	0,4095	+	0,3295	0,0342

d.d.l. = 19

TABLEAU 10 - COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE $P_{25}O_5$ DES AIGUILLES ET $P_{25}O_5$ DU SOL EXPRIME EN
POIDS PAR VOLUME DE SOL - POUR L'ENSEMBLE DE PROFIL.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
l'ensemble de profil.	0,4174	++	0,4025	0,1927	0,4000	++	0,3283	0,1881

d.d.l. = 19

++ = significatif au risque 2 %
+ = " " " 5 %

433 - Corrélation entre phosphore des aiguilles et phosphore du sol
suivant le type génétique de sol

Nous avons effectué les mêmes calculs en divisant nos 21 sols en deux types : les sols bruns calcaires et les rendzines. Rappelons que les sols bruns calcaires ont un profil A (B) C et sont peu riches en matière organique ; au contraire, les rendzines sont de type A/C et riches en matière organique et horizon A₁ très épais.

Il ne faut pas attacher trop d'importance à ces résultats car les calculs ont été effectués sur un nombre d'échantillons trop petit (une dizaine d'échantillons par type de sol). Cependant, nous pouvons en tirer certaines remarques. Seules les deux méthodes JORET - HEBERT et JORET - HEBERT modifiée donnent une corrélation significative pour les sols bruns calcaires, mais non significative pour les rendzines. D'une manière générale, nous pouvons dire que schématiquement les méthodes JORET - HEBERT et JORET - HEBERT modifiée sont bonnes pour les sols bruns calcaires, et la méthode DUCHAUFOR - BONNEAU modifiée meilleure (mais cependant pas excellente) pour les rendzines.

44 - Conclusion

Dans l'ensemble, aucune méthode ne donne de résultats entièrement satisfaisants pour apprécier la disponibilité du phosphore dans les sols calcaires. Les résultats les moins mauvais sont obtenus avec la méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée, la méthode JORET - HEBERT ou la méthode JORET - HEBERT modifiée. Il semble que l'épicéa s'alimente en phosphore à partir de l'ensemble du profil et non pas préférentiellement à partir d'un horizon déterminé.

Lorsqu'on examine les résultats par tranche de sol ou par horizon, les résultats les plus significatifs avec les horizons supérieurs semblent être plus dus à l'action du cycle biologique qu'à une alimentation préférentielle à partir de ces horizons. Le cycle biologique enrichit

les horizons supérieurs en phosphore proportionnellement à la quantité totale de phosphore existant dans tout le profil. D'autre part, dans ces horizons supérieurs, comme d'ailleurs dans l'ensemble du profil, la méthode à $H_2 SO_4$ et NaOH modifiée donne les résultats les plus significatifs. On pourrait en déduire que par le jeu du cycle biologique, le phosphore libéré par minéralisation de la litière se fixe à la fois sur le calcium et sur le fer et l'aluminium, d'où les meilleurs résultats obtenus par la méthode $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée.

Il est possible dans une certaine mesure de donner des valeurs de diagnostic pour les méthodes dont les résultats apparaissent significativement liés à la nutrition en phosphore de l'épicéa. Les coefficients de corrélation étant faibles bien que significatifs, ces valeurs de diagnostic ne sont données qu'avec une certaine réserve.

Pour la méthode à $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée, nous pouvons donner les valeurs de diagnostic suivantes pour les horizons A_1 :

- moins de 0,06 % : teneur faible en phosphore
- de 0,06 à 0,10 % : teneur moyenne
- plus de 0,10 % : teneur satisfaisante

Pour la méthode JORET - HEBERT, les valeurs de diagnostic pour ces mêmes horizons sont les suivantes :

- moins de 0,015 % : teneur en $P_2 O_5$ faible
- de 0,015 à 0,04 % : teneur moyenne
- plus de 0,04 % : teneur en phosphore satisfaisante

Pour la méthode JORET - HEBERT modifiée, les seuils sont les suivants:

.../...

- moins de 0,10 % : teneur faible en phosphore
- de 0,10 à 0,13 % : teneur moyenne
- plus de 0,13 % : teneur satisfaisante.

On notera que les seuils de la méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée ne diffèrent pas des seuils de la méthode habituelle. Par contre, pour la méthode JORET - HEBERT, les valeurs de diagnostic que nous trouvons pour l'épicéa sont nettement inférieures à celles données pour l'agriculture ; par exemple, JORET et HEBERT estiment que les cultures (blé) réagissent jusqu'à des teneurs de 0,25 % de phosphore extrait par l'oxalate d'ammonium.

Ces résultats confirment la faible exigence en éléments minéraux des essences forestières par rapport aux plantes de grande culture.

V - COMPARAISON DES HUIT METHODES EMPLOYEES

Nous avons comparé les 8 méthodes d'extraction utilisées par 3 procédés différents. Nous avons tout d'abord comparé la solubilité des divers produits chimiques connus dans les différents réactifs d'extraction. Nous avons ensuite effectué sur les 5 profils carbonatés, où les différentes formes de phosphore ont été déterminées par la méthode de CHANG et JACKSON, une analyse multivariable sous forme de sept régressions progressives. Dans chacune de ces régressions, la variable à expliquer est le phosphore extrait par une méthode et les variables explicatives, les différentes formes de phosphore. Enfin, nous avons calculé les coefficients de corrélation totaux entre les différentes méthodes sur les 97 échantillons provenant des 21 profils.

5I - Solubilité des diverses combinaisons chimiques de phosphore dans les réactifs d'extraction des méthodes de dosage employées

Nous avons utilisé 5 formes chimiquement bien définies de phosphore et deux formes naturelles complexes :

un phosphate d'aluminium ($\text{PO}_4 \text{ Al}$), un phosphate de fer ($\text{PO}_4 \text{ Fe}$), du phosphate monocalcique ($(\text{PO}_4 \text{ H}_2)_2 \text{ Ca, H}_2 \text{ O}$), du phosphate dicalcique ($\text{PO}_4 \text{ HCa}$), du phosphate tricalcique ($(\text{PO}_4)_3 \text{ Ca}_2$), de l'hydroxyapatite carbonatée ($3 \text{ Ca}_3 (\text{PO}_4)_2, \text{ Ca (OH)}_2$) et enfin une amblygonite ($\text{P}_2 \text{ O}_5, \text{ Al}_2 \text{ O}_3, 2 \text{ Li (F, OH) }$).

Nous avons fait agir sur ces sept formes de phosphore les réactifs des quatre méthodes principales, c'est-à-dire l'acide sulfurique N/250 et la soude N/10, l'acide chlorhydrique concentré et chaud, l'oxalate d'ammonium 0,2 N et enfin la zéolithe de sodium.

.../...

Pour ces essais, nous avons utilisé les mêmes concentrations en réactifs d'extraction que dans les méthodes habituelles de dosage dans les sols. Pour respecter les proportions entre réactif d'extraction et phosphore extractible, nous avons calculé, pour chaque forme chimique naturelle testée, un poids d'échantillon contenant une quantité de P. sensiblement équivalente à ce que l'on trouve habituellement dans les sols. Nous avons de plus ajouté une charge inerte (sable de Fontainebleau traité à l'acide chlorhydrique) pour éviter de manipuler des quantités trop faibles de produit à tester. Bien que certaines combinaisons de phosphore testées, en particulier le phosphate d'aluminium et le phosphate de fer, n'existent pas réellement sous cette forme dans les sols, nous avons pensé néanmoins pouvoir obtenir des résultats intéressants.

Les résultats sont consignés dans le tableau 11.

Nous voyons que la méthode 1 (extraction à l'acide sulfurique N/250 et à la soude N/10 extrait 54 % du phosphate d'aluminium dont 48 % par la soude et 6 % par l'acide sulfurique. Par cette même méthode, nous avons extrait 28 % du phosphate de fer mais uniquement par la soude. Les phosphates mono, di, tricalciques sont extraits dans leur quasi totalité (74 à 84 %) mais uniquement par l'acide sulfurique. L'apatite est extraite à 26 % (20 % par l'acide sulfurique et 6 % par la soude). Enfin, le phosphore de l'amblygonite est extrait à 25 % (extraction uniquement par la soude).

L'acide chlorhydrique concentré et chaud extrait du phosphore en quantité nettement plus importante. Le phosphore est extrait à 55 % du phosphate d'aluminium et à 75 % du phosphate de fer. Le phosphore des phosphates mono, di et tricalciques est extrait en totalité. 48 % du phosphore inclus dans l'apatite sont extraits par l'acide chlorhydrique concentré et chaud, ainsi que 57 % du phosphore inclus dans l'amblygonite.

.../...

(Tableau 11) - Pourcentage de solubilités des diverses combinaisons chimique de phosphore dans les 4 réactifs d'extractions des méthodes de dosage employées.

Diverses combinaisons chimique de phosphore et leurs teneurs en P_2O_5 %	H_2SO_4 N/250 + $NaOH$ N/10	I Somme les 2 extractions	II HCl concentré et chaud	III Oxalate d'ammonium O_2N	IV Zéolithe de Na
	1- H_2SO_4 N/250				
Phosphate d'aluminium PO_4Al 58,2%	5,7	54,0	55,1	13,3	14,9
" de fer PO_4Fe 47,0%	0,0	28,2	75,5	0,5	0,6
" monocalcique $(PO_4H_2)_2$	84,3	84,3	98,5	97,5	99,8
Ca, H_2O 56,3 %.....					
Phosphate dicalcique PO_4H Ca	82,4	82,4	95,5	80,2	99,4
52,1%.....					
Phosphate tricalcique $(PO_4)_3Ca_2$	74,6	74,6	87,2	67,1	48,2
45,7%.....					
Hydroxyapatite carbonatée $3Ca_3(PO_4)_2, Ca(OH)_2$ 37,4%.....	20,6	26,7	48,7	0,6	0,9
Amblygonite $P_2O_5-Al_2O_3, 2Li (F, OH)$ 36,6%.....	0,2	25,7	57,5	0,3	0,8

La zéolithe de sodium extrait à 15 % du phosphore contenu dans le phosphate d'aluminium, la totalité du phosphore des phosphates mono et dicalciques et 48 % du phosphore sous forme tricalcique. Par la zéolithe, nous n'extrayons ni le phosphore du phosphate de fer, ni celui de l'apatite, ni celui de l'amblygonite.

L'oxalate d'ammonium extrait 13 % du phosphore sous forme de phosphate d'aluminium. L'oxalate d'ammonium n'extrait pratiquement pas le phosphore sous forme de phosphate de fer, ou sous forme d'apatite, ou sous forme d'amblygonite. Les phosphates mono, di, tricalciques sont extraits dans leur quasi totalité (67 à 97 %).

Nous pouvons en conclure que la double extraction à l'acide sulfurique et à la soude est la plus complète des 3 méthodes car il est capable d'extraire une partie ou la totalité des 3 principales formes de phosphore (phosphate de fer, phosphate d'aluminium, phosphate de calcium).

L'acide chlorhydrique concentré et chaud extrait la quasi totalité du phosphore du sol. L'oxalate d'ammonium et la zéolithe de sodium extraient plutôt le phosphore sous forme calcique (phosphate mono, di ou tricalcique) et une partie du phosphore sous forme de phosphate d'aluminium.

52 - Formes de phosphore du sol solubilisé par les différents réactifs d'extraction

Sur les 23 échantillons de sols carbonatés, soumis au fractionnement par la méthode de CHANG et JACKSON, nous avons calculé les coefficients de corrélation totaux entre le phosphore extrait par différentes méthodes et les formes de phosphore. Par analyse de régression multiple, nous avons essayé de voir quelle forme de phosphore était préférentiellement extraite par les différentes méthodes.

.../...

52I - Corrélation entre méthode d'extraction et formes de phosphore

Les coefficients de corrélation totaux sont consignés dans le tableau I2. D'après ce tableau, nous pouvons faire les remarques suivantes:

Il existe un coefficient de corrélation très élevé entre, d'une part, la méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ et le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore lié au fer et le phosphore soluble d'autre part. Il est probable que dans le phosphore soluble entre une partie du phosphore lié au calcium. La méthode DUCHAUFOR et BONNEAU extrait par conséquent d'une manière préférentielle le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore lié au fer et la fraction la plus soluble du phosphore lié au calcium.

La modification de la méthode précédente provoque des changements assez importants dans les coefficients de corrélation totaux. On retrouve une liaison aussi importante entre cette méthode et le phosphore soluble que précédemment ; par contre, le phosphore lié à l'aluminium et le phosphore lié au fer apparaissent moins extraits par cette méthode modifiée que par la méthode précédente. Le phosphore lié proprement dit au calcium qui n'était pas significatif dans la méthode normale apparaît de manière significative avec la méthode modifiée. D'autre part, cette méthode DUCHAUFOR et BONNEAU modifiée apparaît liée avec le phosphore inclus dans des combinaisons ferriques et le phosphore organique. La méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée apparaît donc beaucoup plus efficace que la méthode normale par rapport au phosphore lié au calcium. La corrélation entre cette méthode et le phosphore organique mérite également d'être soulignée. Il est difficile de donner des explications ; cela peut provenir de ce que l'extraction plus acide favorise la mise en solution des acides fulviques.

Dans les sols calcaires, le phosphore étant en grande partie lié au calcium, la modification que nous avons apportée à la méthode DUCHAUFOR et BONNEAU par addition de quantité supplémentaire d'acide sulfurique apparaît justifiée puisque cela nous permet d'extraire une plus grande

.../...

-(Tableau 12) - Coefficient de corrélation totale entre les sept méthodes d'extractions et les diverses formes de phosphore.

Diverses formes de phosphore	P.s.	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-Ca.A.	P.in.Fe	P.in.Al	P.O.	P.T.
H ₂ SO ₄ N/250+NaOH N/10 DUCHAUFOR-BONNEAU	+++ 0,7054	+++ 0,6450	++ 0,5450	0,0169	0,2376	0,2098	0,1954	0,3563	0,3086
H ₂ SO ₄ N/250+NaOH N/10 DUCHAUFOR BONNEAU modifiée	+++ 0,7478	+ 0,4351	+ 0,4758	+ 0,4641	0,3594	++ 0,5351	0,1661	+++ 0,6942	+++ 0,6550
Hcl 25 % et chaud FIEDLER	0,1903	+ 0,4293	0,3471	+++ 0,7657	+ 0,4544	+++ 0,9579	+++ 0,6555	+++ 0,9658	+++ 0,9805
Zéolithe de sodium MOLLER-MOGENSEN	0,1700	0,0894	0,1727	0,2095	0,1399	0,1321	0,2996	0,1240	0,0838
Oxalate d'ammonium 0,2 N JORET -HEBERT	0,2493	+++ 0,8958	0,3567	+ 0,4199	0,1012	++ 0,5600	+ 0,4862	++ 0,5329	++ 0,5639
Oxalate d'ammonium 0,2 N JORET - HEBERT modifiée	++ 0,6024	+++ 0,7839	0,3953	0,3450	0,0595	+ 0,5185	+ 0,4526	+ 0,5107	++ 0,5288
H ₂ SO ₄ à concentration variable	+ 0,4705	0,0072	0,1985	+++ 0,6473	+++ 0,6595	++ 0,5671	0,0488	+++ 0,6475	+++ 0,6400

Degré de liberté (d.d.l.) = 21

+++ = significatif au risque de 1%
++ = " " " de 1%
+ = " " " de 2%
+ = " " " de 5%

P.s. = P.soluble
P-Al. = P.lié à l'Aluminium
P-Fe = P.lié au fer
P-Ca = P.lié au calcium
P-Ca.A. = P.lié au calcaire actif
P.in.Fe = P.inclus dans les combinaisons complexes de fer
P.in.Al = P. " " " d'aluminium
P.O. = P.Organique
P.T. = P.Total

partie du phosphore lié au calcium.

La méthode d'extraction à l'acide chlorhydrique concentré et chaud, comme nous pouvions nous y attendre, apparaît beaucoup plus brutale que les deux méthodes précédentes. Il existe en effet un coefficient de corrélation extrêmement élevé de 0,98 entre le phosphore total et cette méthode d'extraction. D'autre part, les coefficients de corrélations totaux sont très élevés entre cette méthode d'extraction et le phosphore lié au calcium, le phosphore inclus dans les combinaisons complexes de fer, le phosphore inclus dans des combinaisons complexes d'aluminium et le phosphore organique. Donc, la différence essentielle entre cette méthode et les deux méthodes précédentes est la possibilité d'extraction des formes de phosphore incluses dans les combinaisons complexes de fer et d'aluminium.

La méthode par extraction à la zéolithe de sodium n'apparaît pas être un moyen d'extraction puissant du phosphore. En effet, il n'existe aucun coefficient de corrélation significatif entre le phosphore extrait par cette méthode et les différentes formes de phosphore du sol.

La méthode JORET - HEBERT, c'est-à-dire la méthode à l'extraction à l'oxalate d'ammonium 0,2 N, présente un coefficient de corrélation total extrêmement élevé avec le phosphore lié à l'aluminium (coefficient de corrélation de 0,895). Cette méthode apparaît également liée à un coefficient de corrélation significatif avec le phosphore lié au calcium. De même, il existe un coefficient de corrélation significatif avec le phosphore inclus dans les combinaisons complexes de fer et d'aluminium et, d'autre part, avec le phosphore organique.

La méthode JORET - HEBERT modifiée diffère essentiellement de la méthode normale par l'apparition d'un coefficient de corrélation total significatif entre le phosphore soluble et le phosphore extrait par la méthode modifiée. Ces résultats sont assez contradictoires ; en effet,

.../...

la modification que nous avons apportée à la méthode JORET - HEBERT a consisté à minéraliser la matière organique mise en solution par l'oxalate d'ammonium. Nous aurions donc dû trouver un coefficient de corrélation total avec le phosphore organique plus élevé avec la méthode modifiée. Or, il n'y a pratiquement aucune différence entre les deux coefficients de corrélation totaux. L'apparition d'un coefficient de corrélation total avec la méthode modifiée et le phosphore soluble semble d'autre part assez inexplicable.

La méthode d'extraction à l'acide sulfurique en concentration variable donne des coefficients de corrélation totaux très significatifs avec le phosphore lié au calcium, le phosphore lié au calcaire actif, le phosphore inclus dans des combinaisons complexes de fer et enfin avec le phosphore organique. Ces résultats apparaissent tout à fait logiques.

522 - Résultats de l'analyse par régression progressive multiple

Nous rappelons brièvement le principe de l'analyse par régression multiple. Etant donné un échantillon composé de n éléments sur lequel on mesure une variable à expliquer, y et p variables explicatives $x_1 \dots x_p$, la meilleure estimation linéaire de y en fonction de x est une équation de la forme :

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p$$

L'estimation de cette équation se fait à partir de la matrice des coefficients de corrélation totaux. La méthode progressive utilisée permet de trouver les p équations successives qui ajustent le mieux y . La première équation n'utilise qu'une variable explicative, c'est-à-dire celle qui explique la plus grande part de la variation de y (celle dont le coefficient de corrélation total est le plus élevé avec la variable à expliquer). La seconde équation concerne cette première variable

.../...

et lui associe une seconde variable qui fournit l'information supplémentaire maximum. Le processus se poursuit ainsi jusqu'à l'introduction des p variables explicatives successives (TOMASSONE - C.N.R.F. 1968).

Cette méthode de travail a l'avantage de faire intervenir simultanément toutes les formes de phosphore. Nous pouvons ainsi essayer de voir dans quelle mesure le phosphore extrait par les différentes méthodes peut être expliqué par les différentes formes de phosphore du sol. Les résultats de ces différentes analyses statistiques sont schématisés par les figures n°7 et 8. Dans la représentation des régressions, nous nous sommes arrêtés à partir du moment où l'écart-type résiduel ne diminue plus par addition d'une nouvelle variable explicative.

Dans le cas de la méthode à l'acide sulfurique et à la soude non modifiée, le phosphore soluble et le phosphore lié à l'aluminium expliquent environ 70 % de la variation du phosphore extrait par cette méthode. Si l'on ajoute à ces deux formes le phosphore lié au calcaire actif, le phosphore organique et le phosphore inclus dans des combinaisons ferriques complexes, en explique environ 80 % du phosphore extrait par cette méthode. En fin de réaction, ou plus exactement au moment où nous avons arrêté la régression, quatre formes interviennent significativement dans l'équation. Ce sont le phosphore soluble, le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore organique et le phosphore inclus dans des combinaisons ferriques complexes.

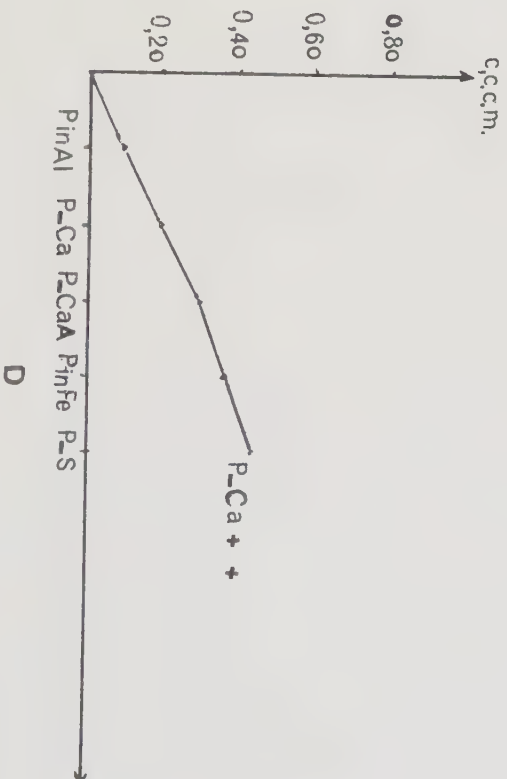
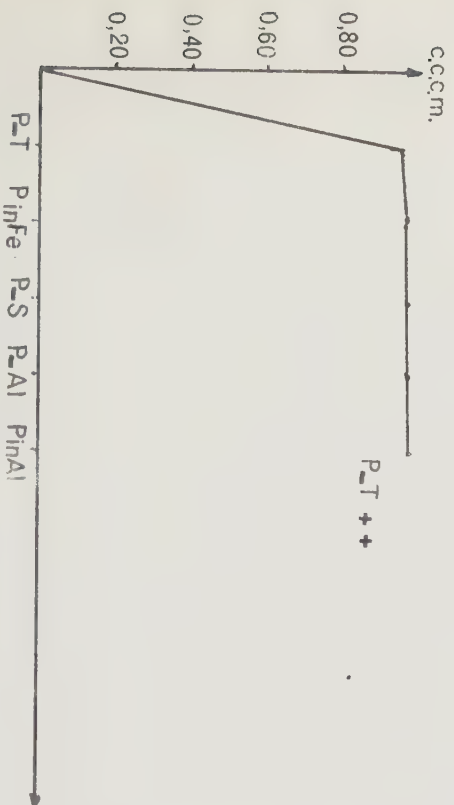
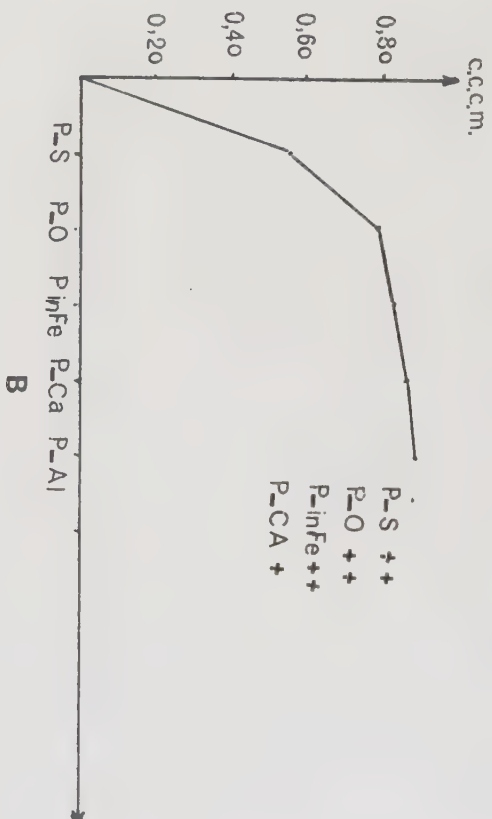
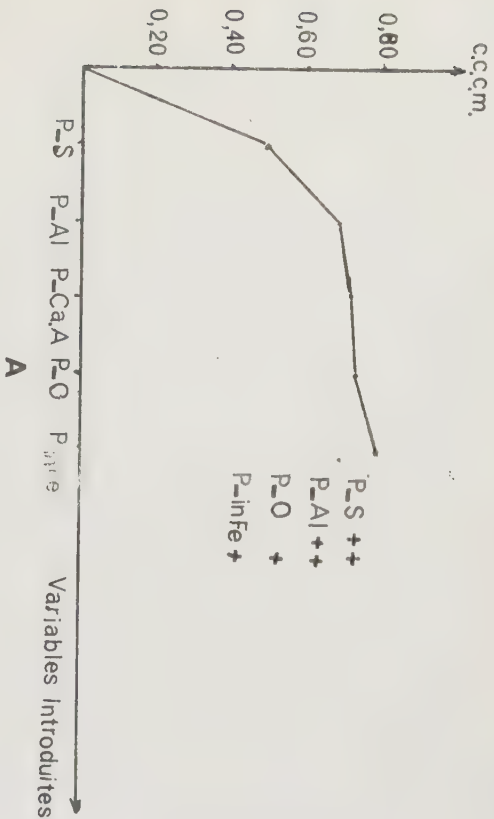
Dans le cas de la méthode $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée, c'est encore le phosphore soluble qui est introduit en tête de la regression, alors que le phosphore organique arrive en seconde position. Ces 2 formes, phosphore soluble et phosphore organique, expliquent à elles seules 80 % du phosphore extrait par cette méthode modifiée. D'autre part, si l'on ajoute à ces deux formes le phosphore inclus dans des combinaisons ferriques complexes, le phosphore lié au calcium et le phosphore lié à

.../...

Fig. 7.-

Analyse de régression multiple

(Variable à expliquer : les 7 méthodes de dosage)
(Variables explicatives : les 9 formes de phosphore)



c.c.c.m. - Carré de coefficient de corrélation multiple

Variables significatives en fin de régression
au seuil de 1 %, au seuil de 5 % *

A- Méthode H_2SO_4 + Na OH

B- Méthode H_2SO_4 + Na OH modifiée

C- Méthode HCl 25 % et ...

D- Méthode Zéolite de Sodium

P-S = Phosphore soluble

P-Al = Phosphore lié à Al

P-Ca = Phosphore lié au Ca

P-Ca, A = Phosphore lié au Calcaire actif

P-O = Phosphore organique

P-T = Phosphore total

P-Al = Phosphore inclus dans les combinaisons, complexes de l'Aluminium

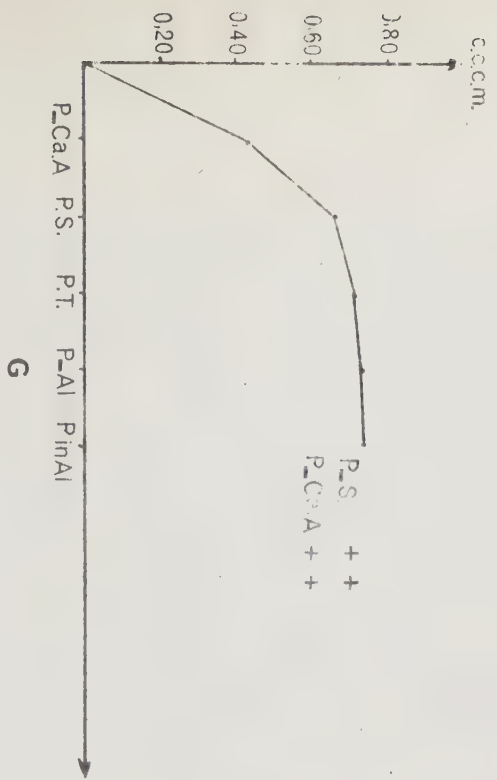
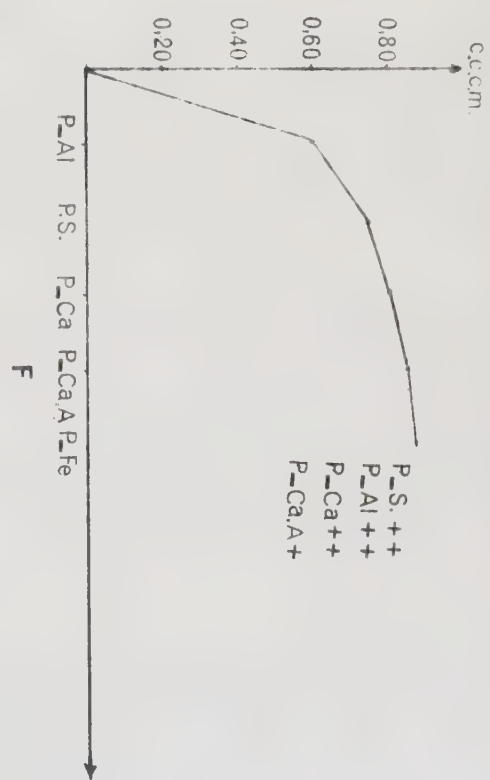
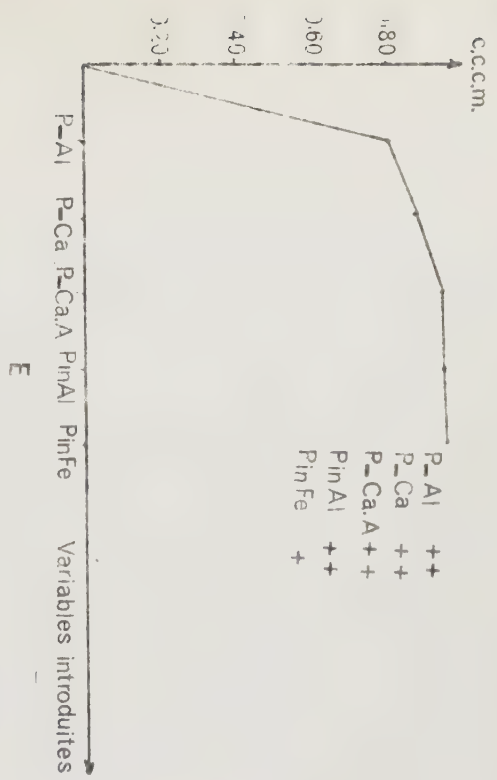
P-Ca, A = Phosphore inclus dans les combinaisons complexes du Fer

P-O = Phosphore organique

P-T = Phosphore total

FIG.8. — Analyse de régression multiple :

(Variable à expliquer : les 7 méthodes de dosage)
 (Variables explicatives : les 8 formes de phosphore)



E - Méthode d'Oxalate d'Ammonium 0,2 N
 F - " " " " modifiée

G - Méthode H₂SO₄ à concentration variable

c.c.c.m. : Carré de coefficient de corrélation multiple
 Variables significatives en fin de régression au seuil de 1 % ++, au seuil de 5 % +

- P-S. - Phosphore soluble
- P-Al - Phosphore lié à Al
- P-Ca - Phosphore lié au Ca ++
- P-Ca.A - Phosphore lié au (autre actif
- PinAl - Phosphore inclus dans les combinaisons complexes de l'Aluminium
- PinFe - Phosphore inclus dans les combinaisons complexes du Fer

l'aluminium, on explique environ 90 % du phosphore extrait. En fin de régression, quatre formes, le phosphore soluble, le phosphore organique, le phosphore inclus dans des combinaisons complexes de fer et le phosphore lié au calcium sont significatives. Si l'on compare les résultats obtenus par ces deux méthodes, méthode à $H_2 SO_4 + NaOH$ et méthode $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée, on constate que dans le second cas le pourcentage d'explication est un peu meilleur. On peut estimer que l'amélioration du pourcentage d'explication est due à une meilleure extraction du phosphore lié au calcium par la méthode à $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée. Ces résultats confirment ce que nous avons obtenu précédemment, à savoir une meilleure extraction du phosphore lié au calcium par la méthode $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée.

Pour la méthode d'extraction à l'acide chlorhydrique concentré et chaud, la régression progressive multiple n'apporte pas d'information supplémentaire ; en effet, comme nous l'avions déjà montré précédemment, cette extraction très brutale extrait la quasi totalité du phosphore du sol. Par le phosphore total, on explique à peu près 96 % du phosphore extrait par cette méthode.

En ce qui concerne la méthode d'extraction à la zéolithe de sodium, le pourcentage d'explication obtenu par la régression progressive est extrêmement faible : nous n'arrivons à expliquer que 40 % du phosphore extrait par cette méthode. D'autre part, sur les cinq formes de phosphore qui interviennent dans l'explication de ces 40 %, seul le phosphore lié au calcium reste significatif.

Pour la méthode JORET - HEBERT non modifiée, le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore lié au calcium et le phosphore lié au calcaire actif expliquent à eux trois 95 % du phosphore extrait par cette méthode et restent tous les trois significatifs en fin de régression. Ces résultats correspondent très bien avec les essais chimiques que nous avons effectués précédemment. Il faut toutefois noter qu'il est assez remarquable que le phosphore lié à l'aluminium arrive en tête de l'explication,

.../...

alors que la méthode JORET - HEBERT a été mise au point pour des sols calcaires, donc des sols où le phosphore lié au calcium est en quantité importante.

En ce qui concerne la méthode JORET - HEBERT modifiée, le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore soluble, le phosphore lié au calcium et le phosphore lié au calcaire actif expliquent 85 % de la variation du phosphore extrait par cette méthode. Ce résultat semble assez anormal car la modification apportée par la méthode JORET - HEBERT non seulement n'augmente pas le pourcentage d'explication pour les différentes formes de phosphore, mais ne montre pas non plus le rôle du phosphore organique qui est libéré dans l'extrait par minéralisation. Ces résultats corroborent les remarques que nous avons faites dans le chapitre relatif aux calculs des coefficients de corrélation totaux.

Pour la méthode d'extraction à l'acide sulfurique à concentration variable, le phosphore lié au calcaire actif est introduit en tête de la régression, ce qui est tout à fait normal. Le pourcentage obtenu est de 70 % avec le phosphore lié au calcaire actif, le phosphore total et le phosphore soluble.

D'après les essais chimiques de solubilité des formes de phosphore chimiquement bien connues, dans les différents réactifs d'extraction, et d'après les résultats des calculs statistiques effectués directement sur les échantillons de sol, nous pouvons aboutir aux conclusions suivantes :

La méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ non modifiée extrait essentiellement le phosphore lié à l'aluminium et le phosphore lié au fer. D'autre part, comme elle apparaît liée très fortement au phosphore soluble, on peut

.../...

penser qu'elle extrait la fraction la plus soluble du phosphore lié au calcium. Néanmoins, l'action de cette méthode sur le phosphore lié au calcium n'apparaît pas très importante, ce à quoi nous avons remédié par addition d'une quantité supplémentaire d'acide sulfurique. Cette méthode ainsi modifiée amène une amélioration très nette du pouvoir d'extraction vis-à-vis du phosphore lié au calcium et indirectement sur le phosphore organique.

La méthode d'extraction à l'acide chlorhydrique concentré et chaud est extrêmement brutale ; elle extrait la quasi totalité du phosphore lié au fer, à l'aluminium ou au calcium, même lorsque le phosphore est sous forme de combinaison complexe de fer ou d'aluminium ou lorsqu'il est sous forme apatitique. Rappelons que dans les essais chimiques, nous avons réussi à extraire par l'acide chlorhydrique concentré et chaud 48 % du phosphore sous forme apatitique.

La méthode d'extraction du phosphore par la résine (zéolithe de sodium) n'a qu'un pouvoir d'extraction extrêmement réduit. Tout au plus extrai-elle une faible fraction du phosphore lié au calcium.

La méthode JORET - HEBERT extrait préférentiellement le phosphore lié à l'aluminium et au calcium. L'oxalate d'ammonium n'a aucune action sur le phosphore sous forme apatitique, comme l'a d'ailleurs montré l'auteur de cette méthode. La modification que nous avons apportée à cette méthode, par minéralisation de la matière organique mise en solution par l'oxalate d'ammonium, permet le dosage d'une quantité beaucoup plus grande de phosphore. Néanmoins, il n'y a pas modification de la valeur des coefficients de corrélation totaux entre le phosphore extrait par cette méthode modifiée et les différentes formes de phosphore du sol, si ce n'est vis-à-vis du phosphore soluble, ce qui est d'ailleurs assez inexplicable.

.../...

La méthode d'extraction à l'acide sulfurique en quantité variable permet exclusivement l'extraction du phosphore lié au calcium, du phosphore lié au calcaire actif, du phosphore soluble, et une partie du phosphore sous forme organique.

53 - Etude des corrélations existant entre les 8 méthodes

Nous avons comparé les 8 méthodes d'extraction en calculant la matrice des coefficients de corrélation totaux de 2 manières : nous avons effectué les calculs d'une part sur l'ensemble des horizons et d'autre part en fractionnant les échantillons en fonction de leur teneur en calcaire.

531 - Etude des coefficients de corrélation totaux entre ces 8 méthodes pour l'ensemble des échantillons

Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau I3. D'après ces résultats, nous constatons à première vue qu'il existe toujours des coefficients de corrélation significatifs entre la quasi totalité des méthodes. Si l'on ne prend en compte que les coefficients de corrélation totaux les plus élevés, on constate que 5 méthodes sont relativement proches les unes des autres, alors que les 3 dernières sont assez différentes. La méthode à $H_2SO_4 + NaOH$, la méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée, la méthode à l'oxalate d'ammonium, la méthode à l'oxalate d'ammonium modifiée et la méthode à l'acide sulfurique à concentration variable forment le groupe des 5 méthodes relativement voisines. La méthode à l'acide chlorhydrique concentré et chaud, la méthode à la zéolithe de sodium et enfin la méthode ne permettant le dosage que du phosphore organique s'écartent de ces 5 méthodes précédentes. Ces 3 méthodes représentent en effet des cas extrêmes : la méthode à l'acide chlorhydrique a un pouvoir d'extraction extrêmement élevé ; la méthode à la zéolithe de sodium a au contraire un pouvoir d'extraction extrêmement faible ; enfin, la méthode SEN GUPTA est très particulière puisqu'elle ne dose que le phosphore organique. Les 5 méthodes formant le premier groupe sont très liées entre elle essentiellement

.../...

TABLEAU 13 - COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES HUIT METHODES POUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS

Méthodes	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
I- $\text{H}^2\text{SO}_4 + \text{NaOH N/10}$ DUCHAUFUR - BONNEAU	-							
II- DUCHAUFUR - BONNEAU modifiée	+++	-						
III- Hcl 25 % et chaud FIEDLER	+++	+++	-					
IV- Zéolithe de sodium MOLLER ET MOGENSEN	+		+					
V- Oxalate d'ammonium 0,2 N JORET - HEBERT	+++	+++	+++	+++	-			
VI- JORET, HEBERT modifiée	+++	+++	+++	+++	+++	-		
VII- H^2SO_4 à concentration variable	+++	+++	+++	+++	+++	+++	-	
VIII- P^2O_5 organique	+++	+++	+++	0,1087	+	+++	++	-

+++ = significatif au risque de 1 %.

++ = " " " 1 %

+ = " " " 5 %

d.d. 1 = 95

parce qu'elles sont toutes capables d'extraire une quantité importante de phosphore lié au calcium. D'autre part, les 2 méthodes à $H_2SO_4 + NaOH$ et les 2 méthodes à l'oxalate d'ammonium sont de plus très liées 2 à 2 parce qu'elles extraient en plus du phosphore lié au calcium, le phosphore lié à l'aluminium.

532 - Corrélation entre les différentes méthodes en fonction de la teneur en calcaire.

Nous avons classé les différents horizons en fonction de leur teneur en calcaire en 4 catégories:

- horizons ayant moins de 10 % de calcaire total
- horizons " de 10 à 25 % " " "
- " " de 25 à 50 % " " "
- " " plus de 50 % " " "

Nous avons ensuite à l'intérieur de chacun de ces groupes calculé à nouveau les coefficients de corrélation totaux entre les différentes méthodes. Les résultats sont consignés dans les tableaux I4 et I5.

Nous pouvons dire que pour ceux contenant moins de 10 % de calcaire total, une seule méthode semble différente des autres, c'est la méthode d'extraction à l'acide chlorhydrique concentré et chaud. Cela provient très certainement du fait que la méthode à l'acide chlorhydrique concentré extrait des formes complexes et peu solubles du phosphore. Or, les échantillons de sol peu riches, ayant moins de 10 % de calcaire, proviennent des horizons supérieurs riches en matière organique et où le phosphore se trouve sous forme facile-ment extractible.

Lorsqu'on passe aux horizons ayant une teneur en calcaire comprise entre 10 et 25 %, on constate que les coefficients de corrélation deviennent encore plus significatifs entre les différentes méthodes. Il semble qu'à ce niveau de teneur en calcaire les proportions entre les différentes formes de phosphore ont tendance à s'uniformiser. La seule méthode qui semble donner des résultats différents des autres méthodes est la méthode 8 qui n'extraît que le phosphore organique.

TABLEAU 14 - COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE LES HUIT METHODES POUR LES 2 GROUPEES D'HORIZONS CLASSES EN FONCTION DE LEUR TENUEUR EN CALCAIRE

Méthodes	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
I - H_2SO_4 N/250 + NaOH N/10 DUCHAUFUR - BONNEAU	-	1ère rangée	les horizons ayant - de 10 % de calcaire	-	-	-	-	-
II - DUCHAUFUR - BONNEAU modifiée	+++ 0,8268 0,8333	2ème	"	"	" de 10 à 25 %	"	"	d.d.l. = 19
III - Hcl 25 % et chaud FIEDLER	0,3634 +++ 0,6840	0,1971 +++ 0,8097	0,0622 +++ 0,7124	+++ = significatif au risque 1 % ++ = " " " 1 % + = " " " 2 % + = " " " 5 %				
IV - Zéolithe de sodium MOLLER - MOGENSEN	++ 0,5994 +++ 0,7777	+++ 0,7782 +++ 0,9401	0,0622 +++ 0,7124					
V - Oxalate d'ammonium 0,2 N JORET - HEBERT	+ 0,4716 +++ 0,868	0,3266 +++ 0,8274	+++ 0,7724 +++ 0,6728	0,3007 +++ 0,7733				
VI - JORET - HEBERT modifiée	+++ 0,5985 +++ 0,8677	+++ 0,7739 +++ 0,9639	+++ 0,1394 +++ 0,8192	+++ 0,9668 +++ 0,9269	0,3499 +++ 0,8526			
VII - H_2SO_4 à concentration variable	0,4197 +++ 0,7850	+++ 0,6953 +++ 0,9596	+++ 0,2512 +++ 0,7720	+++ 0,9027 +++ 0,9215	0,0669 +++ 0,7207	+++ 0,8952 +++ 0,9456		
VIII - Phosphore organique SEN GUPTA - CORNFIELD	++ 0,5830 + 0,4907	++ 0,6163 + 0,4638	+++ 0,3715 +++ 0,8079	+++ 0,8009 +++ 0,3828	+ 0,5117 +++ 0,3317	+++ 0,8419 + 0,5182	++ 0,6119 + 0,4916	-

Dans le 3e groupe d'échantillons où la teneur en calcaire total augmente et est comprise entre 25 et 50 %, les corrélations entre les différentes méthodes ont tendance à diminuer. Les méthodes à l'acide chlorhydrique concentré, à la zéolithe de sodium et la méthode SEN GUPTA deviennent nettement différentes des autres et donnent des coefficients de corrélation avec les autres méthodes, soit non significatifs, soit très faiblement significatifs.

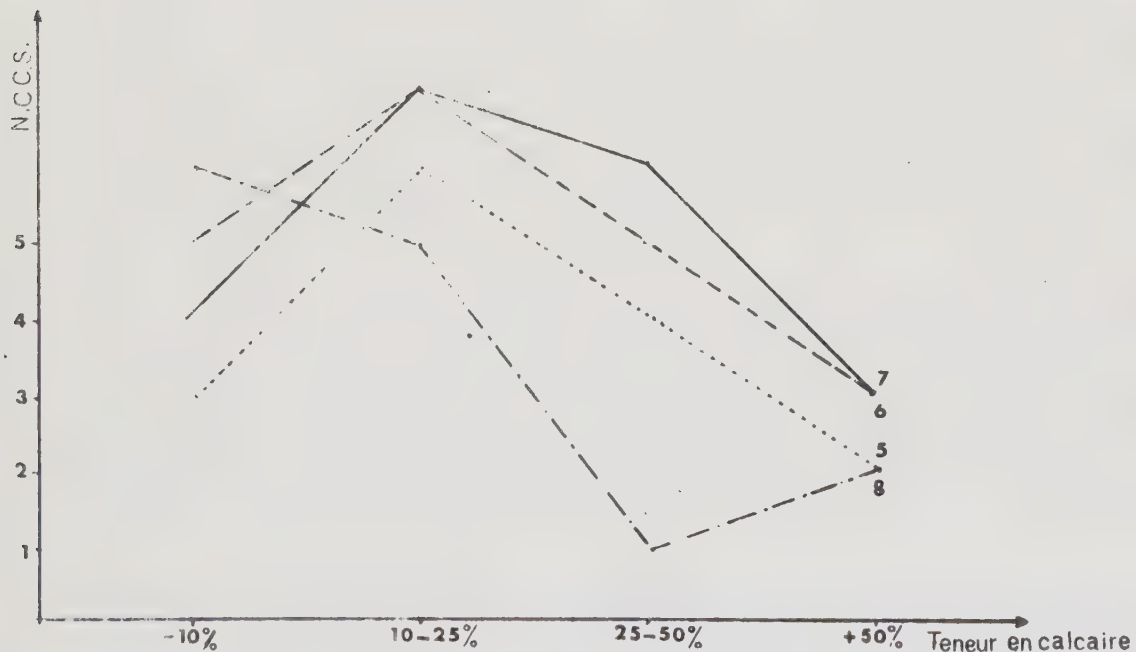
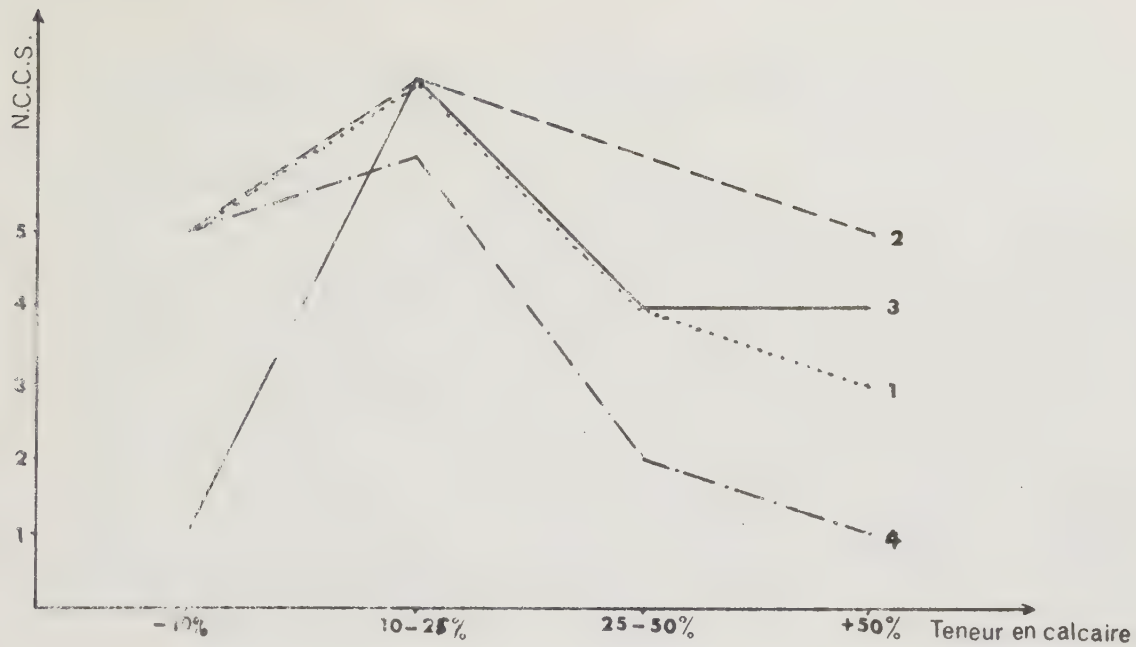
Enfin pour le 4e groupe, c'est-à-dire pour les échantillons ayant plus de 50 % de calcaire total, les méthodes semblent diverger considérablement. Le nombre de coefficients de corrélation significatifs diminue fortement et d'autre part la valeur des coefficients de corrélation significatifs diminue également.

Nous avons enfin étudié la variation du nombre de coefficients de corrélation significatifs en fonction de la teneur en calcaire des échantillons et cela pour chacune des 8 méthodes. (figure n°9). D'après l'allure générale de ce graphique, il semble que lorsque la quantité de calcaire est faible, les méthodes sont extrêmement comparables. Lorsque la quantité de calcaire augmente, les méthodes deviennent de plus en plus divergentes. Ces constatations nous amènent à émettre l'hypothèse suivante: lorsque la teneur en calcaire du sol est faible, les formes de phosphore sont encore diversifiées ; les réactifs d'extraction étant différents, les résultats entre les méthodes sont relativement divergents. Lorsque la teneur en calcaire augmente, c'est-à-dire passe de moins de 10 % à une valeur comprise entre 10 et 25 %, les formes de phosphore ont tendance à s'uniformiser. Le phosphore aurait tendance à être surtout lié au calcium ou au calcaire. Quel que soit le mode d'extraction (sauf la méthode de SEN GUPTA), cette forme passe dans les différents réactifs d'extraction, d'autant plus que tous sont capables d'extraire cette forme de phosphore. Quand la teneur en calcaire augmente encore dans les différents échantillons, il y a apparition de forme de rétrogradation du phosphore. Les quantités de phosphore extraites par les différentes méthodes deviennent alors différentes. Dans l'ensemble, le nombre des coefficients de corrélation diminue et

FIG.9. -

Variation du nombre de coefficients de corrélations significatifs en fonction de la teneur en calcaire

73



N.C.C.S. = Nombre de coefficients de corrélations significatifs

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1- Méthode $H_2SO_4 + NaOH$ | 7- Méthode H_2SO_4 à concentration variable |
| 2- " " " modifiée | 8- Méthode Sen Gupta, Cornfield |
| 3- " $HCl 25\%$ chauffé | |
| 4- " solution de Sodium | |
| 5- Méthode d'oxalate d'Ammonium 0,2 N | |
| 6- " " " " modifiée | |

les méthodes deviennent de plus en plus divergentes.

54 - Conclusion

Les deux procédés que nous avons utilisés pour déterminer les formes de phosphore extraites par les 8 méthodes testées ont donné des résultats très concordants. Rappelons que ces procédés ont consisté d'une part en des essais de solubilité des différentes formes de phosphore chimiquement connues dans les différents réactifs d'extraction et, d'autre part, à rechercher les liaisons existant entre les formes du phosphore du sol déterminées par la méthode de CHANG et JACKSON et le phosphore extrait par les 8 méthodes testées.

Il apparaît que la méthode d'extraction à l'acide sulfurique N/250 et à la soude N/10 permet l'extraction du phosphore soluble, du phosphore lié à l'aluminium et du phosphore lié au fer. La modification de cette méthode par l'utilisation d'une quantité supplémentaire d'acide sulfurique calculée en fonction de la teneur en calcaire actif du sol permet d'extraire les mêmes formes que précédemment et de plus d'extraire une grande part du phosphore lié au calcium.

Par l'acide chlorhydrique concentré et chaud, nous arrivons à extraire la quasi totalité du phosphore du sol. Nous arrivons en particulier à extraire une grande partie du phosphore inclus dans des combinaisons complexes du fer et d'aluminium et même une grande partie du phosphore se trouvant sous forme apatitique (50 % d'après les tests de solubilité).

L'utilisation de l'oxalate d'ammonium (méthode JORET - HEBERT) permet l'extraction du phosphore lié au calcium et l'extraction du phosphore lié à l'aluminium. La modification de cette méthode par minéralisation de la matière organique dissoute dans l'oxalate d'ammonium permet d'extraire une quantité nettement plus importante de phosphore. On peut admettre que ce phosphore supplémentaire provient certainement de la minéralisation de la

.../...

matière organique dissoute dans l'oxalate, bien que les calculs statistiques ne démontrent pas la réalité de ce fait. Il se peut aussi que le phosphore extrait soit adsorbé sur la matière organique extraite et échappe à la colorimétrie dans la méthode non modifiée.

La méthode à la zéolithe de sodium ne permet d'extraire qu'une quantité extrêmement faible de phosphore et seulement une fraction du phosphore lié au calcium.

La méthode ne faisant intervenir que l'acide sulfurique variable permet l'extraction du phosphore soluble et une assez grande partie du phosphore lié au calcium ou au calcaire actif.

Enfin, la dernière méthode extrait exclusivement le phosphore organique.

Rappelons que dans un chapitre précédent, nous avons démontré que les meilleurs résultats, en ce qui concerne l'alimentation de l'épicéa, avaient été obtenus avec soit le méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée, soit avec la méthode de JORET - HEBERT normale ou JORET - HEBERT modifiée. Il est intéressant de noter que ces 2 types de méthodes permettent l'extraction des 3 principales formes de phosphore, c'est-à-dire le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore lié au calcium et le phosphore lié au fer (ce dernier exclusivement par la méthode $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée). Il semble donc bien que l'épicéa s'alimente en phosphore à partir de ces 3 formes.

Cette hypothèse est corroborée par les 2 autres faits suivants: lorsqu'on utilise la méthode habituelle d'extraction à l'acide sulfurique et à la soude, on n'extrait pas, ou on extrait très peu les formes de phosphore lié au calcium. Or, les résultats ne sont pas significatifs ou ne sont que très faiblement significatifs avec la nutrition de l'épicéa (sauf pour les horizons immédiatement inférieurs aux horizons A_1). D'autre part

.../...

lorsqu'on fait intervenir l'extraction à l'acide sulfurique seul, c'est-à-dire lorsqu'on extrait uniquement le phosphore lié au calcium, on ne trouve pas non plus de corrélation significative entre le phosphore extrait et le phosphore utilisé par l'épicéa. Ceci confirme donc bien que dans les sols calcaires, si l'épicéa s'alimente aux dépens du phosphore lié au calcium, il s'alimente également aux dépens du phosphore lié à l'aluminium et au fer, et surtout aux dépens du phosphore lié à l'aluminium puisque nous obtenons de bons résultats avec la méthode JORET - HEBERT. Or, rappelons que cette méthode extrait beaucoup plus de phosphore lié à l'aluminium que de phosphore lié au fer.

Lorsque nous calculons les coefficients de corrélation totaux entre les diverses méthodes, nous constatons que 5 méthodes sont très corrélées entre elles et que 3 autres sont nettement plus divergentes dans l'ensemble. Ces 3 méthodes divergentes sont des méthodes extrêmes permettant l'extraction soit de la quasi totalité du phosphore (méthode à l'acide chlorydrique), soit une très faible quantité de phosphore (méthode à la zéolithe de sodium), soit une seule forme de phosphore (méthode SEN GUPTA qui extrait uniquement le phosphore organique).

Lorsqu'on fait intervenir la teneur en calcaire des différents échantillons, on constate que pour des teneurs faibles en calcaire, les méthodes sont globalement relativement divergentes. Lorsque la teneur en calcaire augmente légèrement, c'est-à-dire qu'elle passe à une valeur comprise entre 10 et 25 %, il semble que l'ensemble des méthodes deviennent plus convergent. Quand la teneur en calcaire des échantillons dépasse 25 % et augmente pour atteindre des valeurs supérieures à 50 %, on constate qu'au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en calcaire, les méthodes deviennent de plus en plus divergentes. Nous pouvons tenter d'expliquer ce phénomène par les hypothèses suivantes :

lorsque la teneur en calcaire des échantillons est faible, les formes de phosphore sont encore relativement diversifiées. Lorsque la teneur en

calcaire augmente légèrement, les formes de phosphore ont tendance à s'uniformiser et à être essentiellement sous forme de phosphore lié au calcium ou au calcaire. Enfin, lorsque la teneur en calcaire des échantillons augmente considérablement, il doit se passer des phénomènes de rétrogradation du phosphore (rétrogradation souvent apatitique) ; comme le pouvoir d'extraction des différentes méthodes est extrêmement variable (faible pour la zéolithe, extrêmement fort pour la méthode à l'acide chlorydrique), dans l'ensemble les méthodes extraient des quantités très différentes et divergent très fortement les unes des autres.

VI - RESUME ET CONCLUSION GENERALE

Dans un précédent travail, nous avons cherché à apprécier la disponibilité du phosphore pour les essences forestières, dans des types de sols très divers par diverses méthodes.

Aucune méthode n'apparaissait très satisfaisante pour deux grands types de sols : les sols bruns humifères du Massif Central et les sols calcaires.

A la suite de ces travaux, nous avons tenté d'aborder le problème du phosphore dans les sols calcaires, ce qui constitue l'objet de cette étude.

Nous avons tout d'abord comparé les formes de phosphore existant dans les sols carbonatés et les sols décarbonatés, en utilisant la méthode de fractionnement de CHANG et JACKSON modifiée par HANOTIAUX.

Nous avons ensuite déterminé le niveau de nutrition en phosphore de 21 peuplements d'épicéas situés en sols carbonatés, par analyse foliaire.

Nous avons essayé d'apprécier la disponibilité du phosphore dans ces 21 sols par huit méthodes d'extraction différentes. En se référant à la nutrition de l'épicéa en phosphore, nous avons pu juger la valeur de ces méthodes et donner des seuils de diagnostic pour certaines méthodes.

Nous avons également comparé les différentes méthodes entre elles par trois procédés différents : nous avons tout d'abord testé la solubilité de diverses formes chimiquement connues de phosphore dans les divers réactifs d'extraction, nous avons ensuite par analyse multivariée tenté "d'expliquer" le phosphore extrait par les diverses méthodes en fonction des

.../...

formes de phosphore existant dans les sols.

Nous avons enfin calculé les coefficients de corrélation entre les diverses méthodes sur l'ensemble des échantillons, puis sur divers groupes d'échantillons classés en fonction de leur teneur en calcaire total.

Seules trois formes de phosphore, le phosphore lié à l'aluminium, le phosphore lié au fer et le phosphore lié au calcium présentent des différences significatives entre les sols carbonatés et les sols décarbonatés.

Les formes de phosphore liées au fer et à l'aluminium constituent une fraction importante du phosphore des sols décarbonatés. Au contraire, dans les sols carbonatés, le phosphore lié au calcium a une grande importance et constitue en moyenne plus du quart du phosphore total. Une partie importante de ce phosphore lié au calcium est adsorbée sur le calcaire actif (1 à 30 % du phosphore total suivant la teneur en calcaire actif). Le phosphore inclus dans les complexes de fer et d'aluminium a une importance équivalente dans les deux types de sols.

Dans les sols carbonatés, le phosphore organique constitue une moyenne 34 % du phosphore total et un peu moins dans les sols décarbonatés (en moyenne 28 %).

Dans les sols décarbonatés de type lessivé, il semble qu'il y ait une migration du phosphore lié à l'aluminium et au fer. Dans ce type de sol, la teneur en phosphore passe en effet par un minimum au niveau de l'horizon lessivé et par un maximum au niveau de l'horizon d'accumulation.

Il apparaît que la méthode d'extraction à l'acide sulfurique N/250 et à la soude N/10 permet l'extraction du phosphore soluble (et en même temps la partie la plus disponible du phosphore lié au calcium), du phosphore lié

à l'aluminium et du phosphore lié au fer. La modification de cette méthode par l'utilisation d'une quantité supplémentaire d'acide sulfurique calculée en fonction de la teneur en calcaire actif du sol permet d'extraire les mêmes formes que précédemment et de plus d'extraire une grande part du phosphore lié au calcium.

Par l'acide chlorhydrique concentré et chaud, nous arrivons à extraire la quasi totalité du phosphore du sol. Nous arrivons en particulier à extraire une grande partie du phosphore inclus dans des combinaisons complexes de fer et d'aluminium et même une grande partie du phosphore se trouvant sous forme apatitique (50 % d'après les tests de solubilité).

L'utilisation de l'oxalate d'ammonium (méthode JORET - HEBERT) permet l'extraction du phosphore lié au calcium et l'extraction du phosphore lié à l'aluminium. La modification de cette méthode par minéralisation de la matière organique dissoute dans l'oxalate d'ammonium permet d'extraire une quantité nettement importante de phosphore. On peut admettre que ce phosphore supplémentaire provient réellement de la minéralisation de la matière organique, bien que les calculs statistiques ne démontrent pas la réalité de ce fait.

La méthode à la zéolithe de sodium ne permet d'extraire qu'une quantité extrêmement faible de phosphore et seulement une fraction de phosphore lié au calcium.

La méthode ne faisant intervenir que l'acide sulfurique en quantité variable permet l'extraction du phosphore soluble et une assez grande partie du phosphore lié au calcaire actif.

Nous constatons que cinq méthodes sont très corrélées entre elles et que trois autres sont nettement plus divergentes. Ces trois méthodes divergentes sont des méthodes extrêmes permettant l'extraction soit de la quasi totalité du phosphore, soit une faible quantité de phosphore, soit

une seule forme de phosphore.

Pour les horizons à teneur faible en calcaire, les méthodes sont dans l'ensemble relativement divergentes. Lorsque la teneur en calcaire est comprise entre 10 et 25 %, l'ensemble des méthodes devient plus convergent. Quand la teneur en calcaire dépasse 25 % et augmente pour atteindre des valeurs supérieures à 50 %, les méthodes ont tendance à nouveau à diverger de plus en plus entre elles.

Il semble que nous puissions expliquer ce phénomène par les hypothèses suivantes :

Lorsque la teneur en calcaire est faible, les formes de phosphore sont encore relativement diversifiées. Quand la teneur en calcaire augmente légèrement, les formes de phosphore ont tendance à s'uniformiser et à être essentiellement liées au calcium ou au calcaire. Comme toutes les méthodes sont plus ou moins capables d'extraire cette forme de phosphore, il y a tendance à l'uniformisation, d'où convergence maximale entre les méthodes.

Quand la teneur en calcaire s'élève, il doit se produire des phénomènes de rétrogradation apatitique. Comme le pouvoir d'extraction est très variable suivant les méthodes, vis-à-vis des formes insolubles, il y a divergence de plus en plus grande.

Aucune méthode ne donne de résultats totalement satisfaisants pour apprécier la disponibilité du phosphore dans les sols calcaires. Les résultats les moins mauvais sont obtenus avec la méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée, la méthode JORET - HEBERT ou la méthode JORET - HEBERT modifiée. Il semble que l'épicéa s'alimente en phosphore à partir de l'ensemble du profil et non pas préférentiellement à partir d'un horizon déterminé.

Lorsqu'on examine les résultats par tranche de sol ou par horizon, les résultats les plus significatifs avec les horizons supérieurs semblent

.../...

être plus dus à l'action du cycle biologique qu'à une alimentation préférentielle à partir de ces horizons. Le cycle biologique enrichit les horizons supérieurs en phosphore proportionnellement à la quantité totale de phosphore existant dans tout le profil.

Il est possible dans une certaine mesure de donner des valeurs de diagnostic pour les méthodes dont les résultats apparaissent significativement liés à la nutrition en phosphore de l'épicéa. Les coefficients de corrélation étant faibles, bien que significatifs, ces valeurs de diagnostic ne sont données qu'avec une certaine réserve.

Pour la méthode à $H_2SO_4 + NaOH$ modifiée, nous pouvons donner les valeurs de diagnostic suivantes, pour les horizons A_1 ;

- moins de 0,06 % : teneur faible en phosphore
- de 0,06 à 0,10 % : teneur moyenne
- plus de 0,10 % : teneur satisfaisante

Pour la méthode JORET - HEBERT, les valeurs de diagnostic pour ces mêmes horizons sont les suivantes :

- moins de 0,015 % : teneur faible
- de 0,015 à 0,04 % : teneur moyenne
- plus de 0,04 % : teneur en phosphore satisfaisante.

Pour la méthode JORET - HEBERT modifiée, les seuils sont les suivants:

- moins de 0,10 % : teneur faible en phosphore
- de 0,10 à 0,13 % : teneur moyenne
- plus de 0,13 % : teneur satisfaisante

.../...

Nous pouvons noter que la méthode à $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée, la méthode JORET - HEBERT et la méthode JORET - HEBERT modifiée permettent l'extraction du phosphore lié au calcium et du phosphore lié à l'aluminium (en plus, la méthode à $H_2 SO_4 + NaOH$ modifiée permet l'extraction du phosphore lié au fer).

Il semble donc bien que l'épicéa s'alimente en phosphore à partir de ces 2 formes dans les sols carbonatés.

Cette hypothèse est corroborée par les deux autres faits suivants: lorsqu'on utilise la méthode habituelle d'extraction à l'acide sulfurique et à la soude, on n'extraît pas, ou on extrait très peu les formes de phosphore lié au calcium. Or, les résultats ne sont pas significatifs ou ne sont que très faiblement significatifs avec la nutrition de l'épicéa. D'autre part, lorsqu'on fait intervenir l'extraction à l'acide sulfurique seul, c'est-à-dire lorsqu'on extrait uniquement le phosphore lié au calcium, on ne trouve pas non plus de corrélation significative entre le phosphore extrait et le phosphore utilisé par l'épicéa. Ceci confirme donc bien que dans les sols calcaires, si l'épicéa s'alimente aux dépens du phosphore lié au calcium, il s'alimente également aux dépens du phosphore lié à l'aluminium.

De plus, la différence essentielle entre la méthode $H_2 SO_4$ modifiée et la méthode JORET - HEBERT est la possibilité pour la première méthode d'extraire le phosphore lié au fer. Or, la méthode à $H_2 SO_4 + Na OH$ modifiée est supérieure à la méthode JORET - HEBERT ou JORET - HEBERT modifiée. On peut donc penser que cette légère supériorité provient de cette possibilité d'extraire le phosphore lié au fer et que l'épicéa s'alimente également en partie à partir de cette forme de phosphore, mais à degré moindre qu'à partir du phosphore lié au calcium et à l'aluminium.

A N N E X E I

Nous donnons dans cette première annexe des fiches descriptives des sols ayant servi de base à ce travail. Nous donnons la description complète d'un ou plusieurs profils par type de sol et pour les autres qui sont semblables à ceux décrits, nous citons seulement la situation exacte et la roche-mère.

La couleur des horizons a été désignée à l'aide du code MUNSELL sur le terrain.

A - SOLS DECARBONATES

=====

Placette 1 - Sol brun lessivé

- Emplacement : forêt demaniale de Chaumours à St-Remy (Côte-d'Or)
- Roche-mère : argile de décarbonatation recouvrant le calcaire Bathonien
- Situation topographique : horizontale, légère dépression
- Peuplement : Epicéa commun (Picéa excelsa), âgé de 91 ans.

Profil :

- A₀ - inexistant sauf à proximité des troncs.
- A₁ - 0 à 5 cm, gris clair, texture limono-argileuse, structure grumeleuse bien développée, grumeaux réguliers de 0,3 à 1 mm. Porosité forte, densité d'enracinement très forte, activité biologique forte. Couleur gris clair.
- A₁₂ - 5 à 12 cm, structure grumeleuse bien développée, grumeaux devenant anguleux de 5 à 10 mm. Porosité forte, densité d'enracinement très forte, brun gris (10 YR 4/3), transition très progressive avec A₂.
- A₂ - 12 à 25 cm, texture limono-argileuse, brun clair (5 YR 5/6), structure à légère tendance grumeleuse, peu développée, grumeaux mal définis de 0,3 à 10 mm, densité des racines moyenne, transition progressive avec B₁.
- B₁ - 25 à 32 cm, couleur (5 YR 4/8), texture argilolimoneuse, structure à tendance polyédrique, porosité moyenne, densité d'enracinement moyenne, transition avec l'horizon sous-jacent progressive.

.../...

- B₂ - 32-100 cm, couleur (5 YR 4/8), texture argilo-limoneuse, structure polyédrique, moyennement développée, les polyèdres peu réguliers de 10 à 20 mm de diamètre, enracinement faible, mais prospection complète par les racines. Quelques cailloux. Transition progressive et très peu visible avec B₃.
- B₃ - de 100 à plus de 200 cm, la couleur 5 YR 4/8 puis 5 YR 5/8 à 200 cm, texture argilo-limoneuse à argileuse, structure de type polyédrique, moyennement développée, polyèdres irréguliers variant de 10-20 mm, enracinement faible, 1 % de cailloux calcaires.

Placette 6 - Sol lessivé

- Emplacement : forêt domaniale du Morthomme (Meuse)
- Roche-mère : limons et argile de décarbonatation sur calcaire du Kimmeridgien
- Situation topographique : très faible pente, exposition Ouest
- Peuplement : Epicéa commun (Picea excelsa), âgé de 38 ans

Profil

- A₀ - 0 à 0,5 cm, existe très nettement, mais uniquement aiguilles sèches, non décomposées.
- A₁ - 0,5 à 2 cm, couleur (25 Y 4/4), texture limoneuse, structure grumeleuse, assez bien développée, grumeaux de 2-5 mm, porosité forte, enracinement dense, petites racines, activité biologique forte, transition assez nette avec A₂.
- A₂ - 2 à 55 cm, couleur brun jaune clair (25 Y 5/4), texture limoneuse, structure de fondue à légèrement polyédrique, très peu développée, une forte porosité, enracinement dense, racines de petite et moyenne dimension, activité biologique assez forte, transition progressive avec A₂/B.

.../...

- A₂/B - 55 à 90 cm, limono-argileuse, couleur 10 YR 5/8, structure de type polyédrique, moyennement développée avec des polyèdres de 15 mm en moyenne, densité d'enracinement moyenne, transition avec B difficile à délimiter.
- B - 90 à 120 cm, limono-argileuse, couleur 7.5 YR 5/6, structure polyédrique très bien développée, avec polyèdres bien individualisés de 10 à 30 mm, porosité moyenne, cohésion assez forte, enracinement faible, transition assez progressive avec Bg.
- Bg - 120 à 140 cm, argilo-limoneuse, couleur 7.5 YR 6/8, structure polyédrique très bien développée, polyèdres de 10 à 40 mm, porosité faible, enracinement également faible, taches d'hydroporphie : 15 % de taches rouille (7.5 Y 5/8) et 15 % de taches décolorées (7.5 Y 5/4), transition assez progressive avec B/C.
- B/C - de 140 cm à plus 200 cm, couleur (10 YR 5/8), avec 1 % de petits cailloux calcaires, à texture argileuse.

Commentaire: le sol est modifié en surface par des éclats d'obus sur 15 cm, dans certains endroits il existe des poches où le sol est modifié sur 40 cm.

Placette 5 - Sol lessivé

- Peuplement d'épicéas de 30 ans situé sur la même roche-mère que la placette 6, profil très semblable à celui de la placette 6. La marmorisation est un peu plus accentuée que dans le profil de la placette 6.

Placette 32 - Sol lessivé

- Emplacement : forêt domaniale de Ligny-en-Barrois (Meuse)
 - Roche-mère : argile de décarbonatation sur calcaire portlandien démantelé
 - Situation topographique : pente faible, sommet de plateau.
 - Peuplement : Epicéa commun, âgé de 44 ans
- Profil: assez semblable aux profils 5 et 6

Placette 30 - Sol brun acide

- Emplacement : forêt domaniale de Ligny-en-Barrois (Meuse)
- Roche-mère : mélange de limons éoliens et de sable valanginien
- Situation topographique : pente faible
- Peuplement : Epicéa commun, âgé de 23 ans

Profil :

- A₀ - 0 à 1 cm, uniquement couche L : constituée d'aiguilles sèches non décomposées.
- A₁ - 1 à 4 cm, sablo-limoneuse, brun gris (10 YR 4/2), structure grumeleuse, moyennement développée, grumeaux irréguliers de 1 à 4 mm de diamètre, racines abondantes de moyenne dimension, activité biologique bonne, transition très progressive avec A₁'.
- A₁' - 4 à 15 cm, sablo-limoneuse, brun gris (10 YR 5/4), structure intermédiaire entre particulaire et grumeleuse, peu développée, porosité très bonne, assez forte densité d'enracinement, horizon de transition.
- A₁ (B) - 15 à 35 cm, couleur brun clair 10 YR 5/6, texture sablo-limoneuse, structure de grumeleuse à particulaire, activité biologique faible, transition progressive avec (B).
- (B) - 35-90cm, texture sablo-limoneuse, structure de particulaire à polyédrique, légère tendance lamellaire, peu développée, brun (10 YR 6/6), forte porosité.
- (B)g - plus de 90 cm, sablo-limoneuse, brun vif 7.5 YR 5/8, structure polyédrique assez bien développée, polyèdres variant de 0,8 à 1,5 mm, porosité faible, bonne cohésion, enracinement faible, 1 % de cailloux gréseux.

Commentaire : il y a un très léger entraînement du fer et de l'argile.

.../...

B - SOLS CARBONATES
=====

Placette 16 - Rendzine humifère

- Emplacement : forêt domaniale d'Aubrive (Haute-Marne)
- Roche-mère : calcaire oolithique du Bathonien
- Situation topographique : pente très faible, altitude : 438 m.
- Peuplement : Epicéa commun, âgé de 81 ans

Profil:

- A_0 - 0 à 5 cm, constitué d'une couche L de 0 à 2 cm (aiguilles d'épicéa non décomposées), couches F et H de 2 à 5 cm, formées de litière en décomposition, très nombreuses racines dont beaucoup de grosses qui couvrent horizontalement, absence de CO_3Ca , transition très brutale avec A_1 .
- A_1 - 5 à 17 cm, noir, très riche en matière organique, structure grumeleuse très bien développée, grumeaux anguleux de 0,5 à 10 mm. Porosité forte, densité d'enracinement forte, activité biologique forte, nombreux petits cailloux calcaires, horizon mollique typique, transition très progressive avec A_1' .
- A_1' - 17 à 32 cm, noir, structure grumeleuse bien développée, porosité forte, densité des racines forte, nombreux petits cailloux calcaires, effervescence à HCl forte, transition très progressive avec A_1'' .
- A_1'' - 32 à 45 cm, gris noir, structure grumeleuse, bien développée, grumeaux ne dépassant pas 0,5 mm, ne diffère de A_1' que par sa moindre richesse en matière organique, effervescence à HCl très forte, transition très brutale avec C.

.../...

- C - plus de 45 cm, constitué de calcaire oolithique blanc démantelé, horizon compact, constitué de morceaux de calcaire de toutes dimensions.

Placette 17 - Rendzine humifère

- Peuplement de 75 ans situé dans la même forêt que la placette 16, sur calcaire oolithique du Bathonien inférieur, profil semblable à celui de la placette 16, rendzine avec horizon A_1/C très développé.

Placette 27 - Rendzine humifère

- Peuplement d'épicéa de 50 ans, forêt communale de Chaillon (Meuse)
 - Roche-mère : grouine, pente assez forte (24°), exposition : Est.
- Mull calcique assez mal structuré en raison de l'absence d'argile.

Placette 38 - Rendzine humifère

- Emplacement : forêt communale de Ligny-en- Barrois (Meuse)
- Roche-mère : marnes du Portlandien
- Situation topographique : début de pente, exposition Nord, pente 9° .
- Peuplement : Epicéa commun, âgé de 57 ans.

Profil :

- A_0 - 1 à 1,5 cm, couche L de 1 cm et couches F-H de 0,5 cm, à peu près constante.
- A_1 - 1,5 à 10 cm, gris noir (25 Y 3/2), texture argileuse, structure grumeleuse, bien développée, grumeaux bien individualisés assez anguleux de 1 à 5 mm. Porosité forte, densité d'enracinement forte, activité biologique forte. Nombreux cailloux calcaires atteignant 10 cm. Transition très progressive avec A_1' .

.../...

- A₁' - 10 à 27 cm, gris 25 Y 4/4, texture argileuse, structure de polyédrique à grumeleuse remarquable, grumeaux ou ployèdres très anguleux de 7 à 8 mm, porosité et enracinement forts, nombreux cailloux, transition très progressive avec C.
- C - 27 à 90 cm, gris clair 5 Y 7/3, texture argileuse, structure à légère tendance polyédrique, extrêmement peu développée, porosité faible, cailloux peu nombreux, sauf à la partie supérieure entre 70 et 80 cm, niveau marneux de couleur ocre et vert gris. Cette couleur est due à une hétérogénéité des marnes plutôt qu'à une influence de l'hydromorphie, effervescence à Hcl forte, transition très brutale avec IIC.
- IIC- plus de 90 cm, blanc gris, calcaire lithographique très dur fissuré. Dans les fissures il y a des marnes où s'infiltrèrent les racines.

Placette 40 - Rendzine humifère

semblable au profil de la placette 38.

Placette 3 - Rendzine brunifiée humifère

- Emplacement : forêt domaniale de Chaumours à St Remy (Côte-d'Or)
- Roche-mère : calcaire démantelé du Bajecien
- Situation topographique : bas de pente, exposition Ouest
- Peuplement : Epicéa commun, âgé de 95 ans

Profil :

- A₀ - sporadique

.../...

- A₁ - 0 à 12 cm, gris brun 75 YR 3/2, texture limono-argileuse, structure polyédrique, très bien développée, porosité forte, enracinement moyen, activité biologique forte, pas de cailloux, absence de calcaire, transition très brutale.
- (B) - 12 à 60 cm, couleur 75 YR 4/4, texture limono-argileuse, structure polyédrique, bien développée, petits polyèdres de 0,3 à 0,5 mm, porosité forte, densité des racines moyenne, très nombreux gravillons calcaires de 0,5 à 1,5 cm, effervescence à HCl très forte, transition assez progressive avec (B)/C.
- (B)/C - 60 à 77 cm, texture limono-argileuse de couleur 10 YR 4/4, structure à tendance polyédrique, moyennement développée, petits polyèdres irréguliers de 0,3 à 0,7 mm, enracinement moyen, faible proportion de petits gravillons de calcaire, transition assez nette avec C.
- C - supérieur à 77 cm, beige clair, texture limono-argileuse, structure à légère tendance polyédrique, faiblement développée, enracinement très faible à nul.

Placette 20 - Sol brun calcaire

- Emplacement ; forêt domaniale de Vauhalaise à Sompuis (Marne)
- Roche-mère : Craie, colluviennée ou solifluée
- Situation topographique : mi-pente, exposition Nord
- Peuplement : Epicéa commun, âgé de 40 ans

Profil :

- A₀ - 0 à 0,5 cm, discontinu, débris de graminées et de mousses en voie de décomposition.

.../...

- A₁ - 0,5 à 3 cm, structure finement grumeleuse, brun gris 10 YR 3/3, texture limono-argileuse, porosité et enracinement forts, cohésion moyenne, transition très progressive avec A₁ / (B).
- A₁ / (B) - 3 à 15 cm, brun légèrement gris 10 YR 3/4, texture limono-argileuse, structure intermédiaire entre grumeleuse et polyédrique, très bien développée, grumeaux très anguleux de 3 à 8 mm, porosité et cohésion moyennes à bonnes, enracinement fort, activité biologique faible, nombreux petits graviers anguleux légèrement usés, effervescence à Hcl très forte, transition très progressive avec (B).
- (B) - 15 à 26 cm, texture limono-argileuse, couleur 10 YR 5/4, structure grumeleuse moins bien développée qu'en A₁, porosité bonne, enracinement faible, nombreux petits graviers, effervescence à Hcl également très forte, transition nette avec C, se fait sur 2 à 5 cm.
- C - plus de 26 cm, blanc 25 YR 8/2, texture sableuse, structure particulaire, porosité bonne, enracinement nul, nombreux graviers anguleux légèrement usés.

Placettes 21 et 22 - Sol brun calcaire

- Peuplement âgé de 40 ans, situé dans la même forêt et sur la même roche-mère que la placette 20, profil semblable, avec un humus mull n'ayant pas l'aspect d'un véritable horizon mollique, malgré la présence de calcaire les deux sols ont un horizon A₁ fossile.

Placette 7 - Sol brun calcaire

- Peuplement d'épicéas âgés de 36 ans, forêt domaniale du Morthomme (Meuse) sur calcaire Kimmeridgien colluvionné, exposition sud ou sud-est, avec

.../...

une légère pente - mull calcique à caractères molliques commençant à se développer.

Placette 37 - Sol brun calcaire

- Forêt particulière près de Commercy (Meuse), sur grouine, Epicéa de 48 ans. Mull à caractères molliques peu marqués, horizon (B) bien développé, sol anciennement cultivé.

Placette 41 - Sol brun calcaire

- Emplacement : forêt domaniale des Eparges (Meuse)
- Roche-mère : Marnes oxofordiennes
- Situation topographique : pente forte, altitude : 340 m, exposition Sud.
- Peuplement : Epicéa commun âgé de 35 ans

Profil :

- A₁ - 0 à 10 cm, brun légèrement gris 10 YR 4/3, texture argilo-limoneuse, structure grumeleuse, moyennement développée, grumeaux anguleux de 1 à 5 mm, porosité moyenne, cohésion forte, enracinement très dense, activité biologique très forte, absence de cailloux, très faible teneur en M.O., effervescence à HCl moyenne, transition très progressive avec (B).
- (B) - 10 à 30 cm, brun vif 10 YR 5/4, texture argilo-limoneuse, absence presque totale de structure, porosité faible, cohésion très forte, enracinement moyen, quelques taches rouille très peu visibles, effervescence forte, transition progressive avec (B)/C.

.../...

- (B)/C - 30 à 70 cm, brun légèrement gris, absence presque totale de structure, quelques unités ont une forme polyédrique, enracinement moyen, quelques taches d'hydromorphie, transition très progressive avec C.
- C - 70 à 120 cm, gris 5 Y 5/2, texture argileuse, structure à légère tendance lamellaire très faiblement développée, enracinement faible, effervescence à Hcl très forte, transition nette et brutale avec II C.
- II C - 120 à 140 cm, brun ocre, texture argileuse, blocs de calcaire.

Placette 42 et 43 - Sol brun calcaire

- Peuplement âgé de 40 ans situé dans la même forêt que la placette 40, sur colluvium de pente, mull sans caractères molliques, sols carbonatés dès la surface.

Placette 83 - Sol brun calcaire

- Emplacement : forêt communale de Villers-en-Haye (M.-et-M.)
- Roche-mère : calcaire Bajocien
- Peuplement : Epicéa commun âgé de 59 ans

Profil :

- A₀ - 0 à 2 cm, constitué d'une couche L de 0,5 cm d'épaisseur, couches F et H de 0,5 à 2 cm, limite nette avec horizon sous-jacent.

.../...

- A₁ - 2 à 6 cm, brun gris, texture argilo-limoneuse, structure intermédiaire entre grumeleuse et polyédrique, bien développée, grumeaux anguleux de 2 à 5 mm. Porosité forte, enracinement fort, petits cailloux de calcaire anguleux, effervescence très faible, transition très progressive avec (B).
- (B) - 6 à 40 cm, brun vif, texture argilo-limoneuse, structure à tendance polyédrique, moyennement développée, polyèdres avec angles ± arrondis de 6 à 12 mm, enracinement bon, porosité moyenne, petits cailloux calcaires, effervescence à Hcl forte, transition assez nette avec (B)/C.
- (B)/C - 40 à 70 cm, brun clair, texture sablo-argileuse, structure polyédrique, transition nette avec C.
- C - Plus de 70 cm, brun clair, texture ~~sab~~lo-argileuse, structure particulière, cohésion très faible à nulle.

Placette 85 - Sol brun calcaire

- Forêt communale de Toul (M.-et-M.), sur alluvions de moyenne terrasse, profil semblable à celui de la placette 83, avec un peuplement âgé de 40 ans.

Placette 12 - Sol brun calcaire colluvial

- Emplacement : forêt communale de Nixeville (Meuse)
- Roche-mère : argile et calcaire colluvionnés
- Situation topographique : bas fond
- Peuplement : Epicéa commun âgé de 40 ans

.../...

Profil :

- A₀ - 0 à 1 cm, litière d'aiguilles non décomposées.
- A₁ - 1 à 2 cm, gris brun 25 Y 4/2, texture limono-argileuse, structure grumeleuse, grumeaux fins de 2 à 10 mm, porosité moyenne, activité biologique forte, enracinement fort, absence de cailloux, transition peu nette avec (B)₁.
- (B)₁ - 2 à 20 cm, brun 10 YR 4/3, texture limon-argileuse, structure polyédrique moyennement développée, polyèdres irréguliers de 3 à 8 mm, porosité et cohésion moyennes, enracinement fort, activité biologique faible, quelques petits cailloux de calcaire, effervescence à HCl moyenne à faible dans la terre fine.
- (B)₂ - 20 à 80 cm, brun plus vif 10 YR 4/4, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique, peu développée, polyèdres irréguliers, enracinement assez fort, effervescence faible dans la terre fine, transition nette avec (B)/C.
- (B)/C - 80 à 130 cm, brun 10 YR 4/4, texture limono-argileuse, structure polyédrique peu développée, unités irrégulières de 5 à 10 mm, faible densité des racines, proportion assez importante de cailloux calcaires de 2 à 5 cm.

Commentaire : bonne alimentation en eau toute l'année.

Placette 4 - Sol brun colluvial

- forêt domaniale de Chaumours à St Remy (Côte-d'Or), peuplement d'épicéas âgé de 85 ans situé sur colluvium très épais de bas fond.

.../...

Placette 44 - Sol brun calcaire colluvial

- Forêt domaniale des Eparges aux Eparges (Meuse), peuplement d'épicéas de 43 ans, sur colluvium de bas fond, humus mull n'ayant pas les caractères molliques, densité des racines jamais très forte, cependant tout le profil est utilisé par les racines jusqu'à 120 cm.

Placette 33 et 34 - Sol brun calcaire colluvial

- Les deux peuplements d'épicéas âgés de 37 et 36 ans appartiennent à la forêt domaniale de Verdun (Meuse), colluvium de bas fond, sols à mull, commençant à avoir des caractères d'horizon mollique. Tout le profil est prospecté par les racines. On peut considérer que la prospection se fait sur au moins 150 cm.

A N N E X E I I -

Propriétés physiques et chimiques des sols

A - sols décarbonatés.

B - sols carbonatés.

A N N E X E I I I -

Teneur en phosphore extrait par les 8 méthodes d'extraction
exprimé en g/m^2 .

- 1 - les 10 premières Cm. des Profils
- 2 - la totalité des Profils

B I B L I O G R A P H I E

ADERIKHIN (P.G.), VOLKOVA (G.S.), 1967 - Adsorption of phosphates by soils at different moisture contents.
Doklady soil Sci., A supplement to soviet soil.
Sci. (13), 1770-1772.

ALEKSEEVA (E.N.), 1968 - Migration of phosphorus down the soil profile during long term use of fertilizers.
AgroKhimiya, (8), 78-82.

ALEXANDER (T.G.), ROBERTSON (J.A.), 1968 - Inorganic phosphorus forms in some Alberta soils as related to soil development, parent material and available phosphorus.
Can. J. soil Sci. 48, 289-295.

AMER (F.), MAHDI (S.), ALRADI (A.), 1969 - Limitation in isotopic measurements of labile phosphate in soils.
J. Soil. Sci. 20 (1), 91-100.

ARMI KAILA, 1963 - Organic phosphorus in Finnish soils.
Soil Sci. 95 (1), 38-44.

ARVIEU (J.C.), 1967 - Evolution des phosphatés solubles en présence de Co_3Ca . Formation de phosphates calciques apatitiques,
D.E.S. Faculté des Sciences de Nice,

ARVIEU (J.C.), 1969 - Les minéraux phosphatés du sol.
Bull. A.F.E.S., (4), 5-16

AUNG-KHIN and LEEPER (G.W.), 1960 - Modification in CHANG and JACKSON'S Procedure for fractionating soil phosphorus.
Agrochimica 4, (3), 243-254.

.../...

- AVAKYAN (N.O.), SUDZHYAN (V.S.), KARAPETYAN (E.A.), 1968 -
Improvement in the methode of determining mobile phosphorus in carbonate soils by extraction with ammonium carbonate.
AgroKhimiya, (1), 125-128.
- BAERT (L.), VAN DEN HENDE (A.), 1967 - Aspects chimiques du phosphate isotopiquement échangeable des sols.
Pédologie 1967, 17, (3), 326-340.
- BARBIER (G.), CHABANNES (J.), MIALLET (P.), 1946 - Absorption des ions phosphoriques à la surface des colloïdes argileux par l'intermédiaire des alcalino-terreux.
Annls agron., (1), 7-33.
- BARBIER (G.), HAAS ARPADNE 1961 - Contribution à l'étude de l'acide phosphorique de terres calcaires.
Annls Agron., (4), 425 -433.
- BARBIER (G.), BIHUS (J.), BONIFACE (R.), 1966 - Influence de la réaction du sol (pH) sur la mobilité des phosphoriques qu'il retient.
C.R. Ac. Agric. de France, (10), 738-745.
- BARROW (N.J.), 1961 - Phosphorus in soil organic matter.
soils and fertilizers, 24, (3), 169-174.
- BASTISSE (E.M.), 1966 - Contribution à l'étude des équilibres entre les sols et les solutions de certains composés du phosphore,
Sci. du sol, (2), 3-14.
- BAULE et FRICKER, 1969 - La fertilisation des arbres forestiers.
B.L.V. verlagsgesellschaft mbH MUNCHEN, 255 P.

- BEZNOSOV (A.I.), 1967 - Determination of available soils by Machigins and Kirsanov's methods.
khim. V. Sol. Khez, 4, 51-53.
- BLANCHET (R.), 1957 - Alimentation phosphatée des plantes et étude des réserves phosphoriques des sols.
C.R. Ac. Agric. de France, (8), 459-463.
- BLANCHET (R.), 1959 - Pouvoir adsorbant des divers constituants du sol à l'égard des ions phosphoriques et examen des réserves des terres.
C.R. Ac. Agric. de France, (6), 247-252.
- BLANCHET (R.), 1960 - Adsorption et dilution isotopique des ions phosphoriques au contact des hydroxydes métalliques et des argiles.
Annls Agron., (1), 55-74.
- BLANCHET (R.), 1961 - Les sols et problèmes agronomiques de Champagne berrichonne.
Bull. A.F.E.S., (3), 115-129.
- BLANCHET (R.), STUDER (R.), CHAUMONT (C.), 1962 - Alimentation phosphorique des plantes et phénomène de contact racines - particules de sol.
Annls. Agron., 13, (1), 21-29.
- BLANCHET (R.), CROUZET (C.), STUDER (R.), CHAUMONT (C.) 1963 - Première indication sur le dynamisme du phosphore dans les sols calcaires de Champagne berrichonne.
C.R. Ac. Agric. de France, (4), 305-317.

- BLANCHET (R.), CHAUMONT (C.), 1964 - Quelques aspects de la désorption et des mouvements d'ions phosphoriques dans le sol et de leur participation à l'alimentation des plantes.
Annls Agron., 15 (5), 519-538
- BOISCHOT (P.), COPPENET (M.), HEBERT (J.), 1949 - Fixation de l'ion phosphorique sur les sables calcaires des sols.
Annls Agron., (1), 103-112.
- BOISCHOT (P.), 1968 - Réaction des phosphates solubles en sols calcaires.
Bull. A.F.E.S. (4), 29-36
- BONNEAU (M.), GELPE (J.), LE TACON (F.), 1968 - Influence des conditions de nutrition minérale sur le dépérissement du Pin maritime dans les landes de Gascogne.
Ann. Sci. Forest. 25 (4), 251-289.
- CECCONI (C.A.), 1957 - La mobilita delle diverse forme del fosforo nel suolo (la mobilité des diverses formes du phosphore dans le sol).
Agrochimica 1, (4), 338-349.
- CHANG (S.C.) and JACKSON (M.L.), 1957 - Fractionation of soil phosphorus.
J. Soil Sci. 84, (2), 133-144.
- CHANG (S.C.) and JACKSON (M.L.), 1958 - Soil phosphorus fractions in some representative soils.
J. Soil Sci. 9, (1), 109-119.
- CHANG (S.C.), JUO (S.R.), 1963 - Available phosphorus in relation to forms of phosphates in soils.
Soil Sci 95, (2), 91-96.
- GONESA (A.P.), 1969 - Etude des formes de phosphore du sol par méthode
CHANG et JACKSON.
Sci. du sol, (1), 15-21.

CRAHET (M.), 1967 - Le pH des sols calcaires.
Bull. A.F.E.S., (4), 17-34.

DECOURT (N.), LE TACON (F.), 1970 - l'épicéa commun (*Picea excelsa*)
sur les plateaux calcaires de l'Est de la France - Essai
de prévision de la production à l'aide de détermination
pédologique simple.
Sous presse.

DELCZEWA-WALEWA (D.), MOSKAL (S.), 1968 - Effects of longcontinued
differential fertilizing on the level of various phos-
phates.
Reczniki - Glebozn. 18, 523-535.

DEMOLON (A.), MARQUIS (A.), 1961 - Le phosphore et la vie.
Que sais-je - Press. Uni. de France, PARIS, 125 p.

DIEST (A.Van.), 1968 - Biological immobilization of fertilizer phos-
phorus.
I - Accumulation of soil organic phosphorus in coastal
plain soils of New-Jersey.
II - Evaluation of factors involved in phosphorus transfor-
mation.
Pl. Soil 29, 241-247 and 248-256.

DUCHAUFOR (Ph.), BONNEAU (M.), 1959 - Une méthode nouvelle de dosage
du phosphore assimilable dans les sols forestiers.
Bull. A.F.E.S., (4), 193-198

DUCHAUFOR (Ph.), 1965 - Précis de pédologie.
Masson et Cie, PARIS, 481 p.

.../...

- DUTIL (P.), DUMON (J.C.), 1967 - Résultat d'une étude de fertilisation phosphatée en sol très calcaire. (Sols de Champagne des CHARENTES).
Bull. A.F.E.S. , (6), 27-35.
- DUVAL (L.), 1963 - Etude des conditions de validité du dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique.
Chimie analytique, 45, (5), 237-250.
- DUVAL (L.), 1964 - Le dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique. Condition de validité. Application à la détermination du phosphore total des sols.
Sci. du sol (2), 53-67.
- FIEDLER (H.J.), 1965 - Die Bestimmung des Phosphors.
Die Untersuchung der Böden, Band 2, 256 p.
- FIFE (C.V.), 1959 - An evaluation of ammonium fluoride as a selective extraction for aluminium - Bound soil phosphate :
II - Preliminary studies on soils.
Soil Sci. 87, (2), 83-88.
- GACHON (L.), 1966 - Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plants.
C.R. Ac. Agric. de France, (15), 1109-1115.
- GACHON (L.), 1969 - Les méthodes d'appréciation de la fertilité phosphorique des sols.
Bull. A.F.E.S., (4), 17-31.
- GOEL (K.N.), AGARWAL (R.R.), 1960 - Total and organic phosphorus in different size-fractions in genetically related soils of Kanpur in the Indian Gangetic alluvium.
J. Indian Soil Sci. 8, 17-22.

- HABIBI (H.), 1968 - Comparaison de trois méthodes de dosage du phosphore dans divers types de sols forestiers.
D.E.A. Faculté des Sciences de Nancy.
- HAGIN (J.), HADAS (A.), 1962 - Solubility of calcium phosphate in calcareous soils.
Nature - Aweokly - Journal Of Sci., 193, 1211-1212.
- HANOTIAUX (G.), 1964 - Le fractionnement des formes du phosphore du sol.
Minist. Agric. Bruxelles - les recherches scient. en agric. 1, 173-190.
- ISLAM (A.), RAHMAN (S.), 1966 - The effect of associated salts on the availability of soil phosphorus and its uptake by rice plants, Pakist. J. biol. agric. Sci., 9, (2), 11-16.
- ISLAM (A.), KHAN (T.H.), 1967 - Distribution of inorganic phosphate in some soils of East PAKISTAN.
Pakist. J. Biol. agric. Sci. 10, (1), 25-30.
- JACKMAN (R.H.), 1955 - Organic phosphorus in New Zealand soils under pasture.
I - Conversion of applied phosphorus into organic forms.
Soil Sci. 79, Mars 1955, (3), 207-213.
- JACKMAN (R.H.), 1955 - Organic phosphorus in New Zealand soils under pasture.
II - Between organic phosphorus content and some soil characteristics.
Soil Sci. 79, Avril 1955, (4), 293-299.

.../...

- JACKSON (M.L.), 1964 - Phosphorus determination for soils, availability, fixation, fraction.
Soil chemical analysis, Prentic - Hall, Inc. 498 p.
- JELNIC (D.), HAJDUKOVIC (M.), 1965 - Influence of organic matter on the solubility of calcium phosphates in soil.
Proc. Symp. F.A.O./I.A.E.A. Ankara 1965, 35-36.
- JORET (G.), HEBERT (J.), 1955 - Contribution à la détermination du besoin du sol en acide phosphorique.
Annls Agron., (2), 233-299.
- JOHN (M.K.), SPROUT (P.N.), KELLEY (C.C.), 1965 - The distribution of organic phosphorus in British Columbia soils.
Canad. J. Soil Sci. 45, 87-95.
- JUNGK (A.), 1968 - Die Alkalität der Pflanzenarche als mass für den Kationenüberschuss in der Pflanze.
Zeitschrift pft. Ernährung Bodenkunde, 120, (2), 99-105.
- JUO (A.S.R.), ELLIS (B.G.), 1968 - particle size distribution of aluminium, iron and calcium phosphates in soil profiles.
Soil Sci. 106-, 374-380
- KARIM (A.), KHAN (D.K.), 1955 - Relation ship between pH and different forms of phosphores in some soils of East PAKISTAN.
soil Sci. 80, Sept. 1955, (3), 229-233.
- KHANNA (P.K.), DATTA (N.P.), 1968 - Distribution of inorganic soil phosphorus in some Indian soils as affected by added phosphates.
Indian J. agric. Sci. 38, 668-676.

- LEVY (G.), 1967 - Influence de certaines propriétés du sol sur la densité d'enracinement de l'épicéa commun et du pin sylvestre.
Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de NANCY.
- LIBISELLER (R.), 1969 - Boden - pH, Düngerphosphate und Bodenuntersuchung.
Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 123, (1), 33-48.
- LINDSAY (W.L.), STEPHENSON (H.F.), 1959 - Nature of the reactions of mono-calcium phosphate monohydrate in soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23, 12-22.
- LENTSCHIG (S.), 1964 - Zur Ermittlung der Nährstoffversorgung Forstlich genutzter Böden mittels Salzsäureauszugs und Vollanalyse.
Düngung und Melioration in der Forstwirtschaft (66), 71-77.
- NAKAYAMA (T.), YAMASCHITA (T.), 1967 - The availability and fixation phosphorus in soils.
Bull. Hatano Tob. Exp. Stn 60, 99-111.
- NODA (M.), SAIJO (K.), 1955 - Action des acides humiques sur l'assimilabilité des différentes formes de phosphates : phosphate de Mn, Ca, Mg,
J. Sci. soil TOKYO (25), 13-16.
- OLSEN (S.R.), 1953 - Inorganic phosphorus in alkaline and calcareous soils.
Academic Press, Inc., N.Y.; Agronomy 4, 89-122.
- OLSEN-STERLING (R.), WATANABE-FRANCK (S.), COSPER-HAROLD (R.), LARSON (W.F.), NALSON (L.B.), 1954 - residual phosphorus availability in long time rotations on calcareous soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28, (2), 144-145.

- PASCAL (P.), 1958 - Nouveau traité de chimie minérale.
Massen et Cie, Paris, tome IV, 973 p.
- PLACE (G.A.), PHILLIPS (R.E.), BROWN (D.A.), 1968 - Self diffusion
of phosphorus in clays and soils.
II - The effect of pH.
Proc. Soil Sci. Soc. Am. 32, 657-660.
- RADET (E.), 1957 - Détermination de l'acide phosphorique assimilable
dans les sols de craie par le réactif au citrate de soude
et évolution des phosphates solubles.
Annls. Agron. (4), 619-632.
- RADET (E.), 1958 - Evolution des phosphates hydrosolubles en sol de
craie.
Bull. A.F.E.S., (3), 102-109.
- RADET (E.), 1960 - Les engrais verts et la mobilisation de réserves
d'acide phosphorique dans les sols de craie.
C.R. Ac. Agric. de France, (17), 1025-1028.
- RADET (E.), 1962 - Contribution à l'étude du comportement des engrais
phosphatée dans les sols de craie.
Bull. A.F.E.S., (5), 287-305.
- RAUTERBERG, DERVISCH (A.), 1967 - Korrelation Zwischen Bodenunter-
suchungsergebnissen auf plt wert eines.
Bodens auf die nach verschiedenen Methoden ermittelten
phosphorgehalte.
Zeibchrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde II8,
(2), 85-100.

.../...

- RENNIE (D.A.), BOLE (J.B.), 1968 - The migration and mechanism of phosphorus movement from ammonium phosphate pellets using autoradiographic Techniques.
Trans. 9th int. Congr. soil Sci. 2, 775-786.
- RIEHM (H.), 1958 - Die ammoniumlaktessige Methode zur Bestimmung der leichtlöslichen Phosphorsäure in karbonathaltigen, Boden.
Agrochimica, (3), 49-65.
- SALONEN (M.), 1968 - Apatite as a phosphorus fertilizer.
J. Scient. agric. Soc. Finl. 40, 209-218.
- SASPORTES (P.), 1967 - Contribution à l'étude de l'influence du calcium, du fer et de l'aluminium sur la transformation du phosphore minéral en phosphore organique,
Thèse Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de NANCY.
- SCHOEN (U), BARBIER (G.), HENIN (J.), 1954 - Evolution des phosphates calciques dans les conditions du sol.
Annls Agron., (4), 441-457.
- SCHULLER (H.), 1969 - Die CAL - Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren phosphates in Boden.
Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 123, (1), 48-63.
- SEN GUPTA (M.B.), and CORNFIELD (A.H.), 1962 - Phosphorus in calcareous soils.
II - determination of the organic phosphorus content of calcareous soils and its relation to soil calcium carbonate content.
J. Sci. Food Agric. 13, Décembre 1962, 655-658.

.../...

SEN GUPTA (M.B.), CORNFELD (A.H.), 1963 - Phosphorus in calcareous soils.

III - Available phosphate in calcareous soils as measured by fine chemical methods and phosphorus uptake by Ray - grass in pet tests.

J. Sci. Food Agric. 14, 563-567.

SMITH (A.N.), 1968 - The aptake of phosphorus by wheat and clever from four inorganic soil phosphate fractions after the addition of contrasting types of phosphatic fertilizer. Plant and soil, 29, (1), 144-155.

SOKOLOV (A.V.), 1958 - Supply of available soil phosphates and their accumulation when phosphorus fertilizers are applied. Soviet Soil Sci. 2, 117-124.

SOKOLOV (A.V.), 1968 - Determination of reserves of available phosphates in the soil, their composition and mobility. Soviet Soil Sci. (8), 1037-1047.

STROEHLEIN (J.L.), SABET (S.A.), CLEMENTZ (D.M.), 1968 - Response of plants to polyphosphate on calcareous soils. Agron. J. 60 , 576-577.

SUTTON (C.D.), 1969 - Effect of low soil temperature on phosphate nutrition of plants - a review. J. Sci. Fd Agric. 20, 1-3.

SYERS (J.K.), WILLIAMS (J.D.H.), WALTER (T.W.) and CAMPBELL (A.S.) 1967 - Significance of apatite inclusions in soil phosphorus studies. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 31, 752-756.

SYERS (J.K.), WALTER (T.W.), 1969 - Phosphorus transformation in a chronosquence of soils developped on wind - Blewn sans in New Zealand.

I - total and organic phosphorus.

J. Soil Sci. 20, (1), 57-64.

II - Inorganic phosphorus.

J. Soil Sci. 20, (2), 318-324.

TOMASSONE (R.), 1969 - Analyse de régression progressive.
Station de biométrie C.N.R.F. NANCY.

TRIPATHI (B.R.), TANDON (H.L.S.), TYNER (E.H.), 1970 - Native inorganic phosphorus forms and their relation to some chemical indices of phosphate avaibility for soils of Agra district, INDIA.
Soil Sci., 109, (2), 93-101.

VIRMANI (S.M.), MOULINIER (H.), MAZOYER (R.), 1966 - Contribution à l'étude de méthode de dosage de l'acide phosphorique des sols.
Annls Agron. 17, (2), 143-155.

WEY (R.), 1956 - Etude de la rétention des anions phosphoriques par les argiles : Montmorillonite et Kaölinite.
Annls Agron. (1), 1-62.

WHITE (R.E.), 1968 - Buffering capacity of soil on uptake of phosphorus by plants.
Trans. 9th int. Congr. soil Sci. 2, 787-794.

WIER (D.R.), BLACK (C.A.), 1968 - Soil organic phosphorus and plant growth.
III - Availability coefficient of mineralized organic phosphorus.
Soil Sci. 106, 265-269.

NOM DE L'ETUDIANT : HABIBI KASSEB Hossein

Nature de la Thèse : Docteur-Ingénieur

Vu, Approuvé

et Permis d'imprimer

NANCY, le 8 Juin 1970

Le Doyen,

J. AUBRY

